

Cours d'Électronique pour l'Option Réseaux Locaux et Informatique Industrielle.

Chapitre 11. (non fait en TC EN)

La transmission numérique sur fibre optique.

11-1 Introduction.

Jusqu'ici nous n'avons parlé que des supports bifilaires métalliques (paire torsadée, câble coaxial, micro ruban imprimés) et de la transmission hertzienne (chapitre 10 édité à part dans le cours intitulé "transmissions hertziennes)..

Pour les très hauts débits sur longue distance, comme les différents niveaux de la hiérarchie numérique à TN4 140Mbits/s ou TN5 560Mbits/s ou les débits de la hiérarchie synchrone STM1 (155,52Mbits/s), STM4 (622,08Mbits/s), STM16 (2488,32Mbits/s) ou STM64 (9953,28Mbits/s) qui atteint le 10Gbits/s, on ne peut plus utiliser le support métallique il ne reste que la fibre optique.

En utilisant le langage habituel des électroniciens on peut dire que la fibre optique transporte les données binaires sous un format simple (à deux niveaux) grâce à une porteuse électromagnétique de fréquence énorme de l'ordre de $3 \cdot 10^{14}$ Hz.

Il s'agit d'une porteuse lumineuse (infra rouge) assez proche du visible. Avec ces fréquences nous sommes dans les longueurs d'onde du μm (0,8 à $2 \cdot 10^6$ m). Pour être simple disons que l'on réalise de la modulation d'amplitude en tout ou rien ($m=100\%$) par les données binaires.

Spectre électromagnétique

Le **spectre électromagnétique** est la description du **rayonnement électromagnétique** selon ses différentes composantes en terme de **longueur d'onde**. C'est le principe du **prisme** qui décompose la **lumière blanche** en **arc-en-ciel**. Chaque « couleur » correspond à une **longueur d'onde**.

Longueur d'onde	Domaine	
> 10 cm	Radio	(150 kHz - 3 GHz)
De 1 mm à 10 cm	micro-onde et radar	(10 cm - +- 1cm, 3 - 300 GHz)
De 1 μm à 500 μm	Infrarouge	
De 400 nm à 700 nm 0,4 à 0,7 μm	Lumière visible	Rouge (620-700 nm) Orange (592-620 nm) Jaune (578-592 nm) Vert (500-578 nm) Bleu (446-500 nm) Violet (400-446 nm)
De 10 nm à 400 nm	Ultraviolet	(400 - 280 nm) 0,4 μm
De 10^{-8} m à 10^{-7} m		
De 10^{-11} m à 10^{-8} m	Rayon X	
De 10^{-14} m à 10^{-12} m	Rayon γ	

Pour les rayonnements X et γ , on ne parle généralement plus de longueurs d'ondes. Comme on a affaire à des rayonnements très énergétiques, on les caractérise par leur énergie en **électron-volt (eV)**.

Un eV est l'énergie d'1 **électron** accéléré par un **potentiel** de 1 **volt**.

Les photons de lumière visible les plus énergétiques (violet) sont à 3 eV.

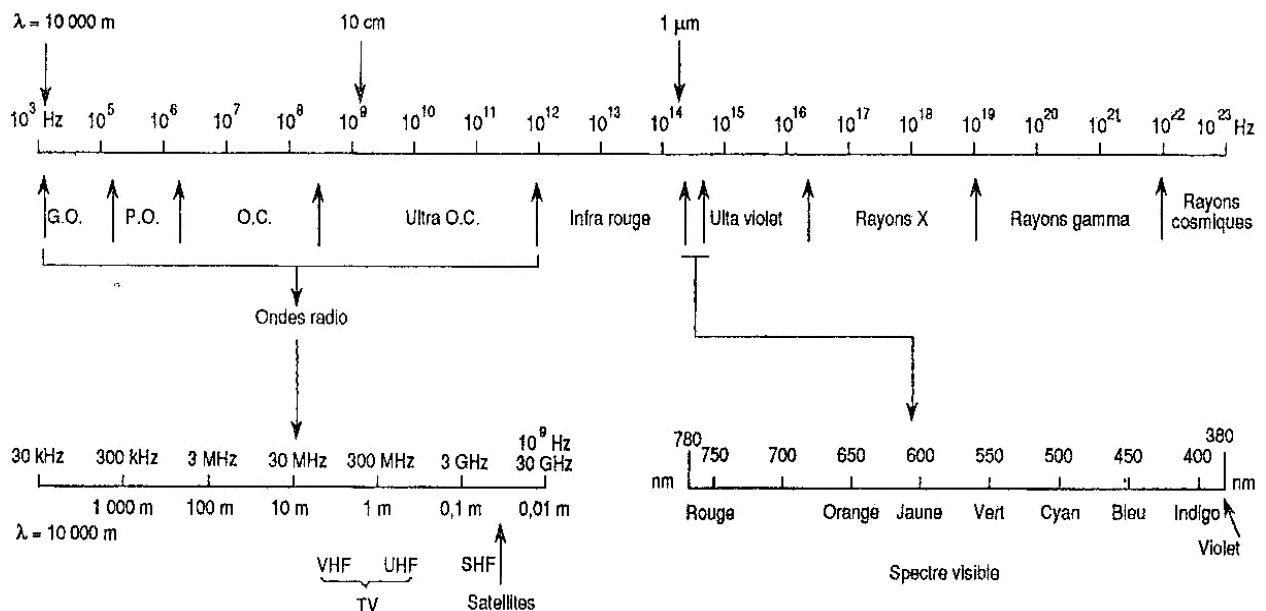
Les rayons X couvrent la gamme 100 eV à 100 keV.

Les rayons γ sont au-delà de 100 keV. Des photons γ de plus de 100 MeV (100 000 000 eV) ont été détectés émis par un **quasar**.

Notez que l'œil voit un octave de 0,4 à 0,7 μm soit de 4 à 7,5 10^{14} hertz.

La fibre utilise l'Infra Rouge proche de 0,9 à 1,5 μm , la porteuse est aux alentours de 210^{14} hertz.

Voici un aperçu global du spectre électromagnétique



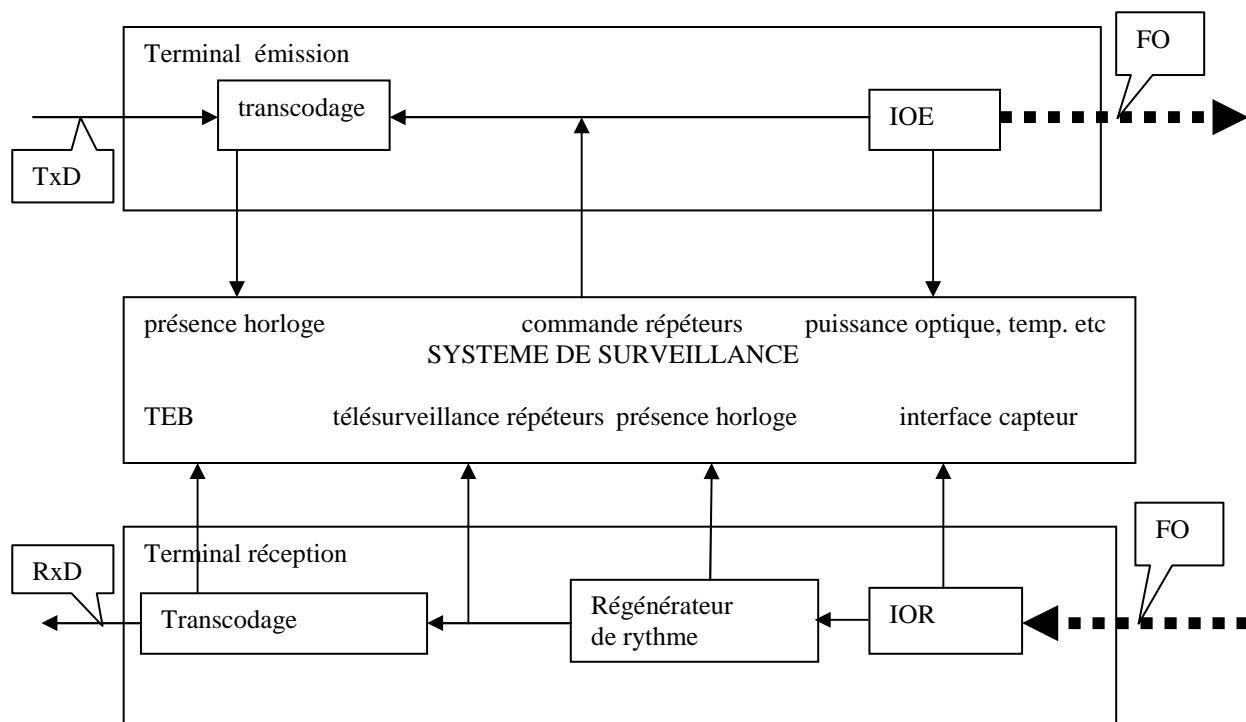
Notons que l'idée d'utiliser la lumière pour communiquer à distance est très ancienne et avait été abandonnée faute de support, fin du 19eme siècle, car l'électricité était la science dominante en progrès rapide.

La possibilité assez récente de guider la lumière sur de grandes distances et la réalisation de source optique modulables très rapidement (au GHz et plus) ont provoqué un essor rapide du transport optique.

11-2 Forme générale d'une liaison duplex par un groupe de fibres optiques.

L'émission de la porteuse lumineuse et sa réception nécessite des interfaces ou composants optoélectroniques aux deux extrémités de la fibre.

La liaison duplex est symétrique, la figure ne montre qu'une moitié et un couple de fibre.



IOE : Interface Optique d'Emission.

IOR : Interface Optique de Réception.

La surveillance, ici simplifiée, gère également les répéteurs et leur télé alimentation, lorsqu'ils sont présents.

Du fait de son volume infime on peut la grouper par centaines dans des "câbles" et sur de longues distance.

Elle est totalement insensible aux problèmes de voisinage, aucun phénomènes de diaphonie ou "cross talk" pourtant si gênant en bifilaire.

Elle est présente partout où le métal est inutilisable, réseaux industriels en milieu très perturbé, milieu radioactifs, télémessure en milieu THT, ou milieu à fort rayonnement EM. Dans sa forme économique (bas de gamme plastique), nous la trouvons associée aux automates, puis prochainement dans le câblage automobile.

Disons que la FO de qualité est irremplaçable sur longue distance et haut débit.

Elle montre peu de pertes en dB/km.

Les meilleures fibres actuelles offrent des bandes passantes impressionnantes.

11-3 Descartes, Fermat et les autres et la fibre optique.

Comme son nom l'indique il s'agit tout simplement de **guider** la lumière monochromatique (dans un conduit avec le minimum de réflexions sur les parois. Rappelons les mécanismes de base concernant la propagation de la "lumière" :

Le champs électromagnétique lumineux se propage dans le vide à $Clum = 3.10^8$ m/s.

Dans un milieu différent, transparent à la longueur d'onde choisie, la vitesse est inférieure et devient :

$V = Clum / n$ ce qui défini l'indice de réfraction n du milieux de propagation.

On se souvient que la propagation libre du champs Electromagnétique se fait avec une vitesse (de plan d'onde ou de phase) égale à $1/(\mu.\epsilon)^{1/2}$. le milieu de propagation étant caractérisé par sa perméabilité magnétique μ (ou $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m), et par sa permittivité diélectrique ϵ (ou $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m).

Par conséquent $Clum = 1/(\epsilon_0.\mu_0)^{1/2}$ pour le vide et $V = Clum / (\epsilon_r)^{1/2}$ pour un milieu de permittivité relative ϵ_r

De même, l'impédance: $Z = (\mu / \epsilon)^{1/2} = Z_v / (\epsilon_r)^{1/2} = Z_0 / n = 120\pi / n (\Omega)$

Il est clair que le langage classique des ondes hertziennes rejoint celui de l'optique en posant $\epsilon_r = n^2$

Ainsi l'air présente un indice $n = 1,0003$, par conséquent le vide et l'air seront toujours confondus en propagation électromagnétique ou optique.

Le mécanisme de la réfraction est à la base du guidage de la lumière : il explique les modifications du trajet optique à l'interface d'un milieu d'indice n_1 vers un milieu d'indice n_2 , aussi appelé dioptre.

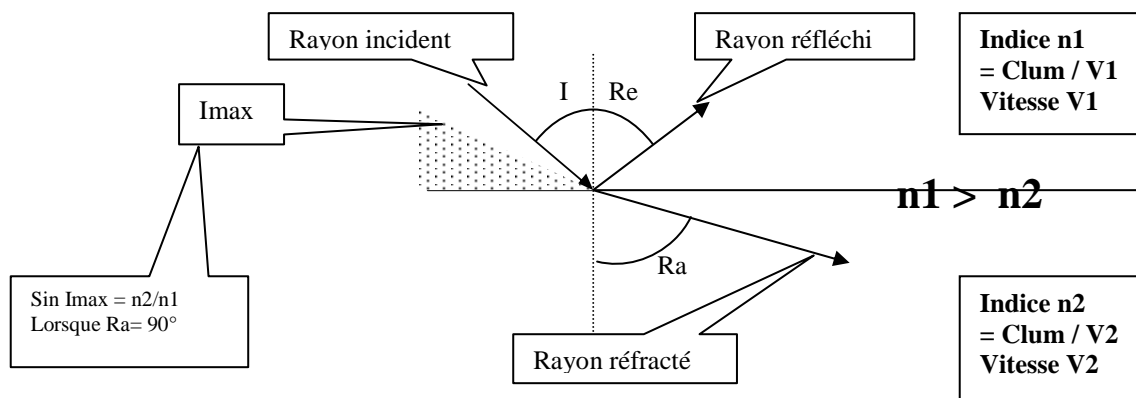
La lumière circule avec la vitesse $V_1 = Clum/n_1$ dans le milieu 1 et attaque le dioptre avec un angle d'incidence I , puis pénètre avec la vitesse $V_2 = Clum/n_2$ dans le milieu 2, avec l'angle Ra de réfraction.

L'angle Ra et I sont liés par les lois de Descartes :

$$n_1 \sin I = n_2 \sin Ra.$$

L'expression montre que I et Ra varient dans le même sens.

La figure est faite pour $n_1 > n_2$, c'est-à-dire $I < Ra$.



On a naturellement $n_1.\sin I_{max} = n_2.\sin Ra_{max} = n_2.\sin 90^\circ = n_2$.

Et $\sin I_{max} = n_2/n_1$ définit l'angle d'incidence maximum I_{max} au dessus duquel il n'y a plus réfraction mais uniquement **réflexion interne**, c'est à dire que la lumière reste dans le milieu d'origine par réflexion, **et cette incidence limite n'existe que si $n_1 > n_2$.**

Ces propriétés à la traversée d'un dioptre conduisent au principe de la propagation guidée dans une fibre optique.

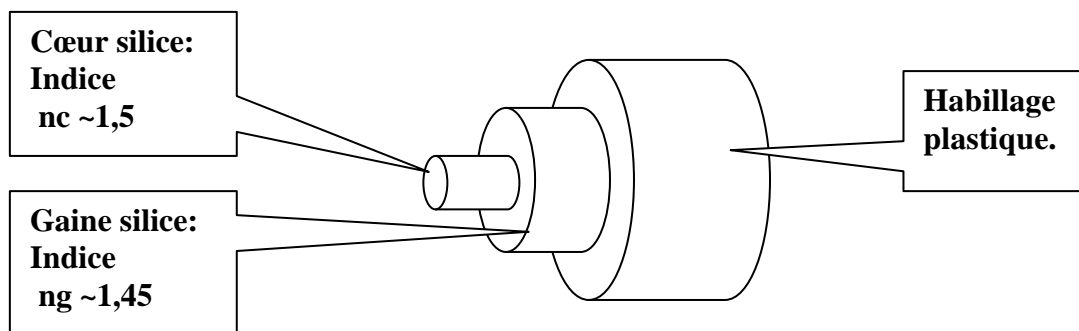
C'est la réflexion interne qui est à la base du guidage dans la fibre.

Remarque : C'est pourquoi les grands pêcheurs sont plus avantageés que les petits pêcheurs ! ($n_{\text{eau}} = 1,33$) (leur visibilité à travers l'eau porte plus loin, puisque $\sin R_a = 1,33 \sin I$ soit $\sin I = 0,75$ et $I_{\text{max}} = 49^\circ$)

11-4 La fibre à 2 indices, dite à saut d'indice (la plus ancienne).

C'est la première fibre sortie des laboratoires dans les années 70, elle est constituée d'un cœur de diamètre 100 à 600 μm entouré d'une gaine de quelques centaines de μm . **Donc guider la lumière revient à dépasser l'angle d'incidence limite pour confiner celle ci dans un tuyau central ou cœur.** Comme on ne sait pas réaliser un cœur creux, on réalise deux cylindres de verre d'indices différents. On habille donc le cœur d'indice n_c par une gaine d'indice n_g et avec n_c supérieur à n_g (les indices n_c et n_g sont très voisins à quelques 10^{-3} , de l'ordre de 1,5 pour la plupart des verres).

Le cœur est à grand diamètre de 100 à 200 μm , la gaine a un diamètre Φ_g voisin de 400 μm .

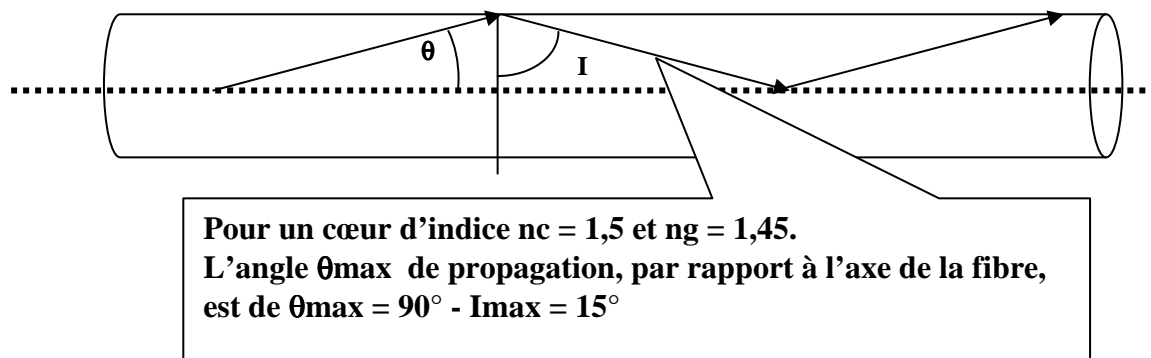


L'anatomie d'une fibre à saut d'indice, donc à propagation multimode.

Seuls les rayons dont l'inclinaison θ par rapport à l'axe de la fibre est inférieure à $90^\circ - I_{\text{max}}$ se propagent confinés par le dioptré cœur/gaine.

Or on a $\sin I_{\text{max}} = n_g / n_c = \cos (90^\circ - I_{\text{max}}) = \cos \theta_{\text{max}}$.

Par exemple avec un cœur d'indice $n_c = 1,5$ et une gaine d'indice $n_g = 1,45$ seul les rayons d'incidence supérieure à $\arcsin n_g/n_c = \arcsin 1,45/1,5 = 75^\circ$ pourront se propager.



La fibre à deux indices porte l'onde par une infinité de trajets tels que l'inclinaison reste inférieure à 15° !

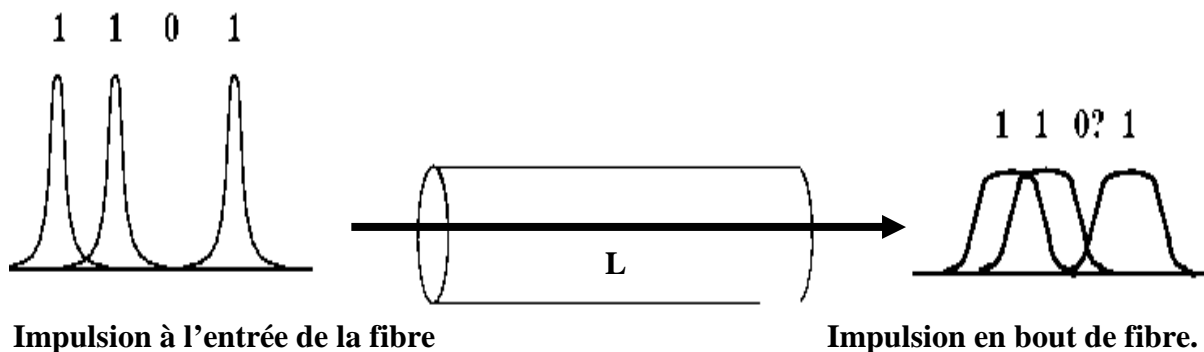
C'est pourquoi ces fibres sont aussi nommées fibres multi modes ou multitrajets, ce qui va disperser les temps de trajets et par conséquent "étaler" dans le temps l'arrivée d'une impulsion lumineuse.

(on assiste à un phénomène similaire lors de la course Marseille Cassis)

On note que pour le trajet le plus incliné (de θ_{\max}), le temps pour parcourir une distance L sera de $t_p = nc.L / Cl_{um} \cdot \cos\theta_{\max}$. (on se souvient que $ng/nc = \cos\theta_{\max}$). Finalement le trajet le plus incliné met le temps $t_{p\max} = (L.nc^2)/ng.Cl_{um}$. De même le trajet le plus rapide dure $t_{p\min} = nc.L / Cl_{um}$.

L'étalement temporel pour une distance L devient :

$$t_{p\max} - t_{p\min} = \Delta t_p = (nc L / Cl_{um}) (1 / \cos\theta - 1) = (nc.L / Cl_{um}) (nc/ng - 1)$$



Un étalement Δt_p limite la transmission des hautes fréquences à $F_{\max} = 1 / 2 \Delta t_p$.

Par conséquent, il ne faut pas espérer transmettre du binaire dont la Rapidité de Modulation RM serait supérieure à $1 / 2\Delta t_p = ng/nc \cdot Cl_{um} / 2L$ ($nc-ng = \approx Cl_{um} / 2L$) ($nc-ng$) = RM_{\max} .

Les codes sont généralement bivalents ($V = 2$) donc débit binaire et rapidité de modulation sont confondus.

Ceci montre pour les fibres à saut d'indice, une limite du produit débit X distance de l'ordre de $Db.L \leq Cl_{um} / 2.(nc-ng)$.

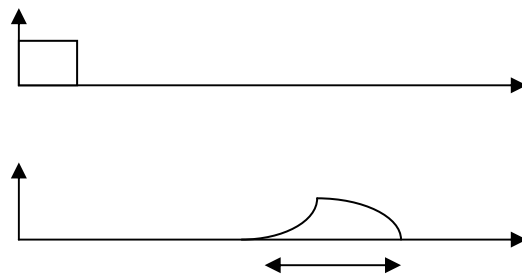
On voit l'intérêt de réduire l'écart entre les indices nc et ng .

Avec $n_c - n_g$ de quelques 1% on obtient une limite $Db.L$ de l'ordre de 3.10^{10} bit m / s.
C'est-à-dire 30Mbit/s pour 1 km.
C'est-à-dire 3Mbit/s pour 10 km.

On voit la limite de débit binaire imposée par la dispersion modale si l'on veut une grande portée L.

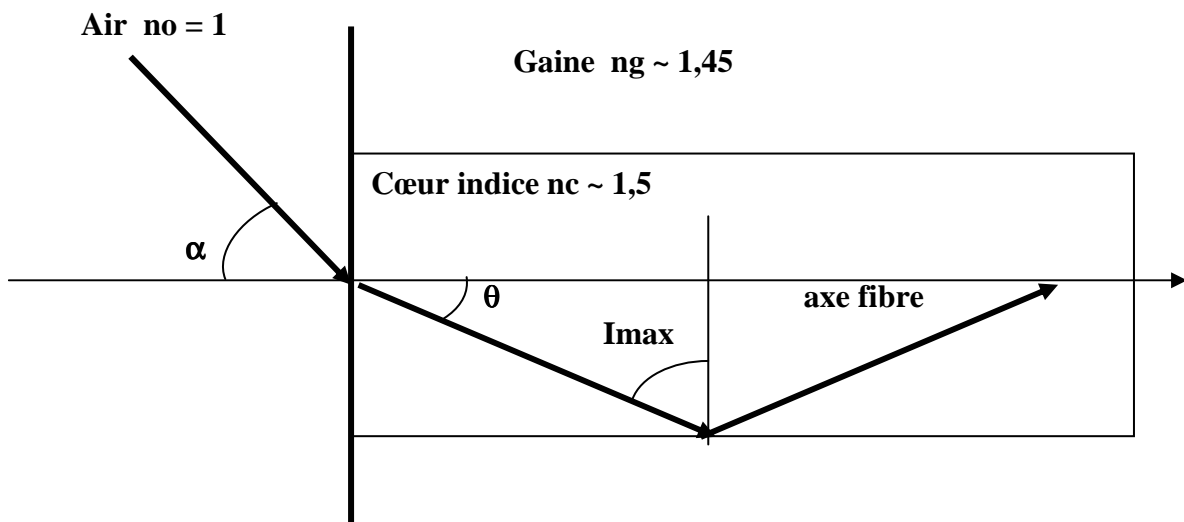
Remarque : On trouve couramment la règle d'usage suivante pour ces premières fibres :
 La règle simple à retenir qui lie bande passante et dispersion est :
 $B-3dB = 1 / \pi \Delta t_p = c \text{ lum} / \pi L (n_c - n_g) = 10^8 / (n_c - n_g) L$
 Le produit $B-3dB \cdot L = 10^8 / (n_c - n_g)$

Remarque : On retrouve un phénomène comparable à l'IES déjà constatée sur les supports métalliques bifilaires.



11-5. Le problème de la pénétration efficace du flux de la source : angle d'acceptance et Ouverture Numérique ON.

La pénétration dans la fibre est conditionnée par la loi de Descartes, qui fixe l'angle α de pénétration, à la face d'entrée du coeur, supposée dans l'air ($n_o = 1$).



On a donc $n_o \cdot \sin \alpha = n_c \cdot \sin \theta$ soit encore $\sin \alpha = n_c \cdot \sin \theta$.
 La propagation se fait si l'inclinaison θ est inférieure à θ_{max} .
 Par conséquent l'angle d'acceptance maximum α_{max} , à l'entrée est donné par :
 $\sin \alpha_{max} = n_c \cdot \sin \theta_{max} = n_c \cdot (1 - \cos \theta_{max}^2)^{0,5} = n_c \cdot (1 - n_g^2/n_c^2)^{0,5}$.
 Ou bien :

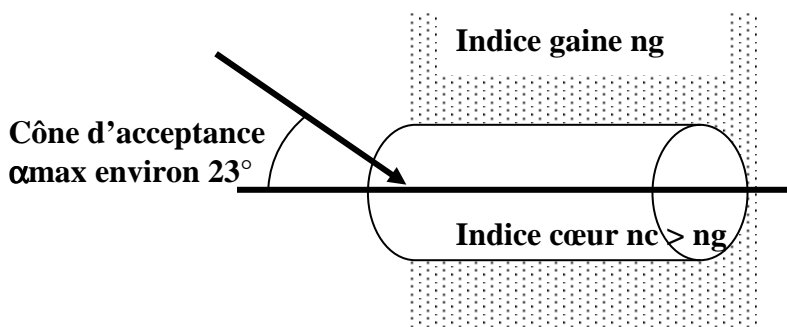
$$\sin \alpha_{\max} = (n_c^2 - n_g^2)^{0,5} \quad \text{qui est l'ouverture numérique ON}$$

Ainsi avec les exemples chiffrés précédents on a :

$$\text{ON} = \sin \alpha_{\max} = n_c \cdot \sin \theta_{\max} = 1,5 \sin 15^\circ = 1,5 \cdot 0,26 = 0,39.$$

Ainsi l'angle limite α_{\max} avec la face d'entrée du cœur ($n_c = 1,5$) est défini par $\sin \alpha_{\max} = 0,39$ soit $\alpha_{\max} = 23^\circ$.

Angle d'acceptance au delà duquel la lumière n'est plus guidée. Cela impose une source très directive orientée vers le cœur. Nous verrons que la source la plus efficace est la diode électroluminescente à effet laser.



Plus l'ouverture numérique est élevée plus les trajets divergent et plus l'étalement ou IES limite le débit.

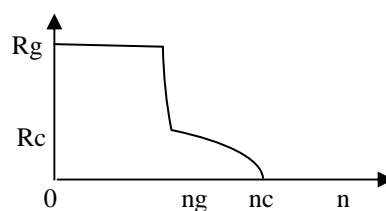
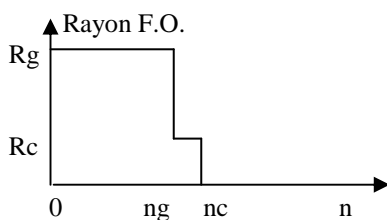
On voit ici l'importance de l'injection dans la fibre.

Pour réduire cette dispersion les fabricants ont modifié le profil d'indice et adouci la transition cœur gaine : ce sont les fibres à gradient d'indice.

11-6 La fibre à gradient d'indice :

Pour réduire les effets de la différence des temps de parcours on a mis au point des fibres où l'on ralentit les trajets voisins de l'axe de la fibre et où l'on accélère les trajets éloignés du centre. Il s'agit de fibres où l'indice varie graduellement du centre vers la gaine, ce sont les fibres à gradient d'indice.

Les profils exprimés en indice n lié à la distance au centre r , peuvent être comparés.



Ainsi les trajets les plus écartés (angle de réflexion grand) se font dans les indices les plus faibles de la gaine.

Il y a compensation de l'allongement du trajet par une augmentation de la vitesse de propagation.

Ainsi la dispersion est assez réduite par rapport à la fibre à saut d'indice, ce qui conduit à un produit bande passante X portée qui atteint 1,5 GHz.km.

Il est actuellement clair que ces chiffres sont insuffisants et nous allons décrire la fibre de haute qualité qui propose des produits débit par portée à plus de 20GHz.km (voir article annexe).

Il s'agit de la fibre monomode évidemment la plus chère !

11-7 La fibre monomode :

C'est en l'état actuel de l'art, la fibre la plus performante.

Le diamètre du cœur est réduit à l'extrême, de l'ordre de λ ($\Phi = 2,4 \lambda / \pi ON$), c'est à dire moins de 2 μ m.

Dans ces conditions, les équations de Maxwell montrent que seul le mode de propagation parallèle à l'axe de la fibre existe.

C'est donc un énorme progrès par rapport aux deux types de fibres multimodes.

Il n'y a plus de dispersion temporelle.

Le débit est théoriquement illimité, et ne dépend que de la source d'excitation de la fibre.

Mais avec ces fibres si fines la difficulté réside dans la pénétration du flux de la source sur la face d'entrée de la fibre.

Cela sera résolu avec des sources très directives qui font appel à des cavités optiques dites lasers.

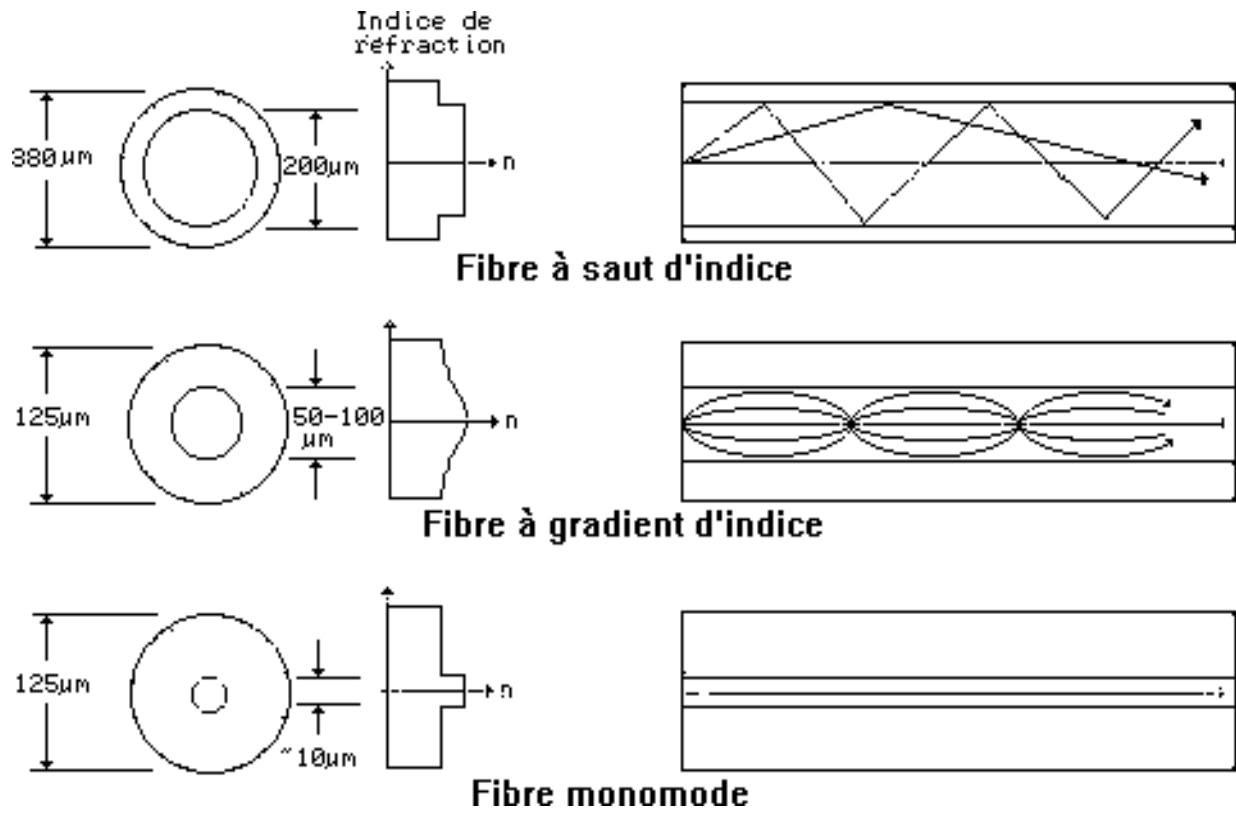
Par contre sa fabrication draconienne en taux d'impureté est fort délicate et coûteuse.

La silice doit présenter un taux d'impureté inférieur à 10 mg / tonne. (alors qu'un verre de lunette se contente de 10 g /tonne !) !

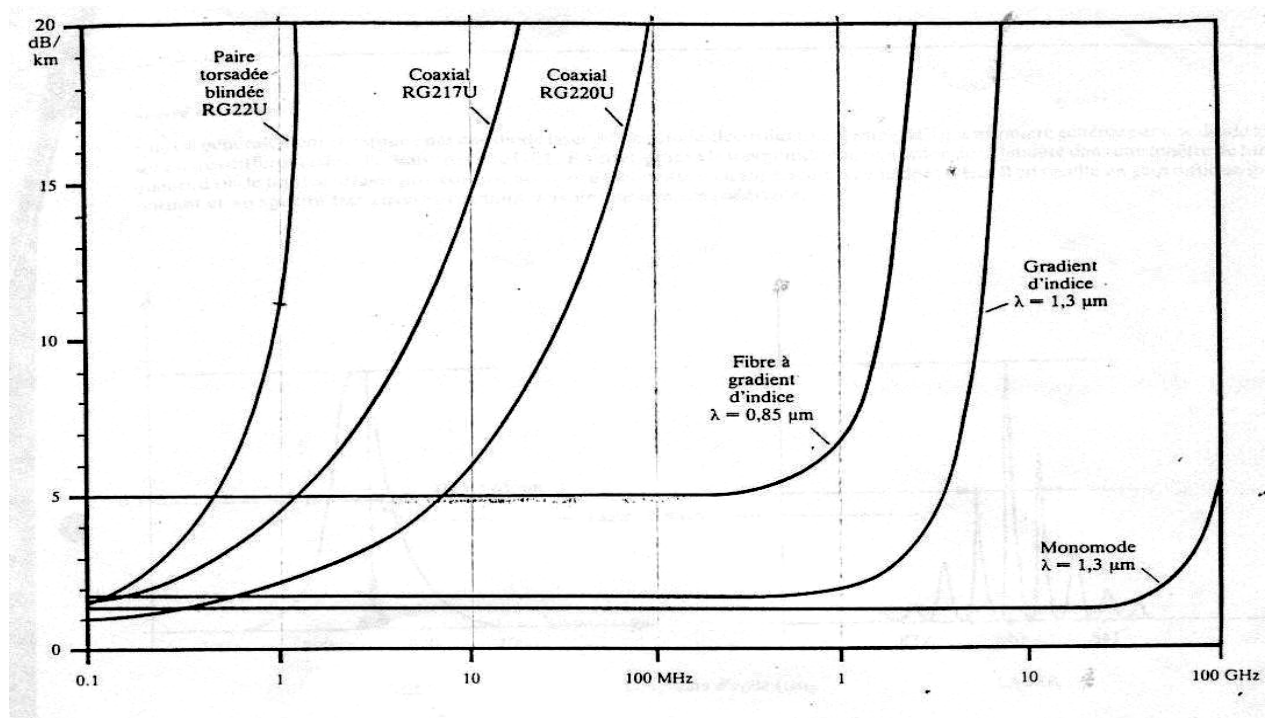
A ce prix on obtient actuellement un débit binaire de environ 6 Gbits/s pour 100 km !

11-8 Comparaison des 3 types de fibre :

Les trois modes de propagation : source CNET



Atténuations en dB/km comparées pour les câbles coaxiaux et les fibres.



On remarque d'une part la supériorité des fibres sur le cuivre et d'autre part la supériorité de la fibre monomode

11-9 Les récepteurs optiques ou convertisseur lumière-courant.

Le récepteur à effet photoconducteur : la photodiode.

Hertz Gustav, vers 1887 étudie la photoélectricité expérimentalement, 13 ans plus tard Planck introduit une théorie quantifiée de l'énergie lumineuse, imaginant l'existence du photon.

Et tout part de la relation capitale donnant l'énergie portée par un photon de fréquence ν ou de longueur d'onde λ . ($\lambda = c_{lum} / \nu$).

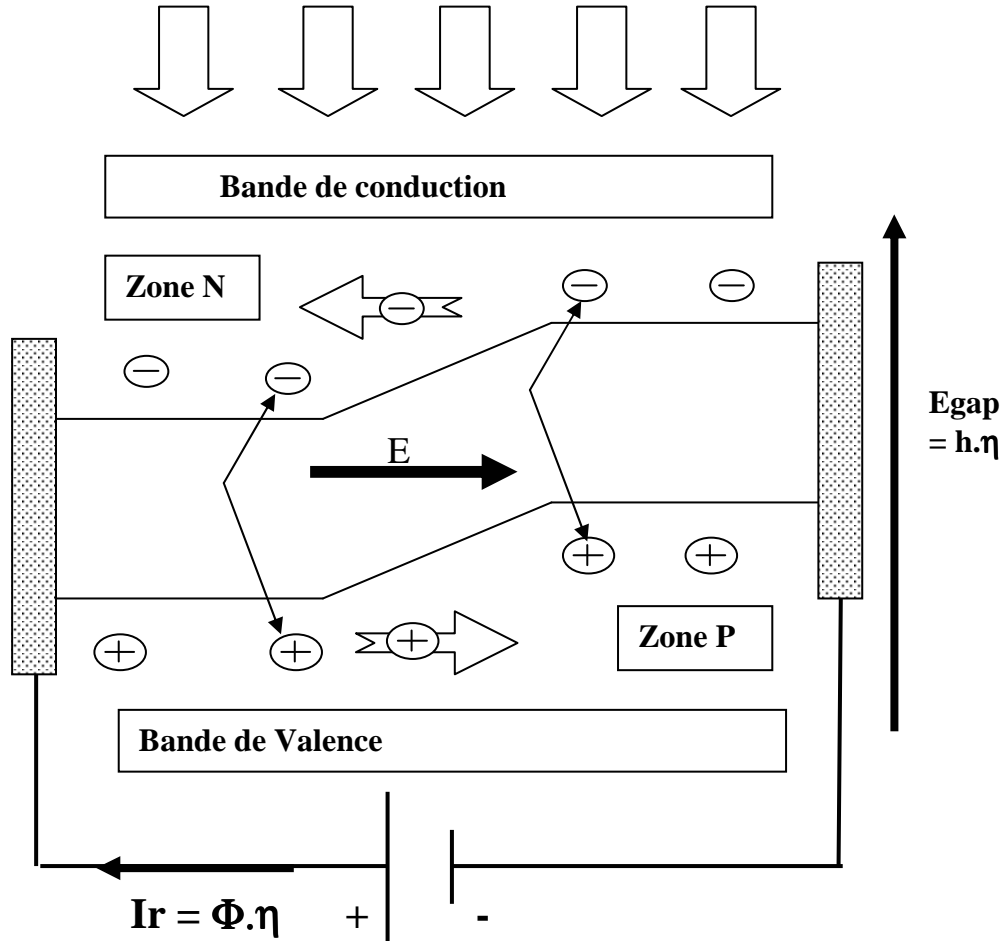
$$E = h \cdot \nu = h \cdot c_{lum} / \lambda \quad \text{avec } h, \text{ constante de Planck} = 4,1 \cdot 10^{-15} \text{ eV.s}$$

(eV unité d'énergie d'un photon soumis à un champ électrique de 1 V/m)

Dans un cristal le noyau est entouré d'électrons fortement liés et d'autres moins liés, ces derniers, sous certaines conditions d'apport d'énergie extérieure, peuvent participer ainsi à la conduction.

Notamment, un flux lumineux de fréquence ν ($\nu = c_{lum} / \lambda$) constitué de photons peut entraîner le détachement de porteurs mobiles.

L'aspect énergétique de ces phénomènes est décrit par le schéma classique bande de valence, gap, bande de conduction.



Tous les composants transducteurs lumière /électricité utilisent les phénomènes de saut de porteurs (électrons et trous) entre bande de valence et bande de conduction. Les photons incidents créent des paires électrons trous des deux cotés de la jonction, les électrons libérés passent en conduction, les trous restent en bande de valence. La pile extérieure crée le champ électrique E (V/m).

Les photons excités ($E_{gap} = h \cdot \nu$) passent de l'état lié au noyau (bande de valence) à l'état libre (bande de conduction) créant une paire electron/trou participant à la conduction. La polarisation inverse extérieure crée un champs E orienté de la zone N vers la zone P, qui pousse les trous et attire les électrons.

En simplifiant à l'extrême on obtient un courant inverse I_r proportionnel au nombre de photons par seconde, c'est à dire au flux éclairant Φ (W/m^2). Ainsi le courant inverse résultant I_r vaut :

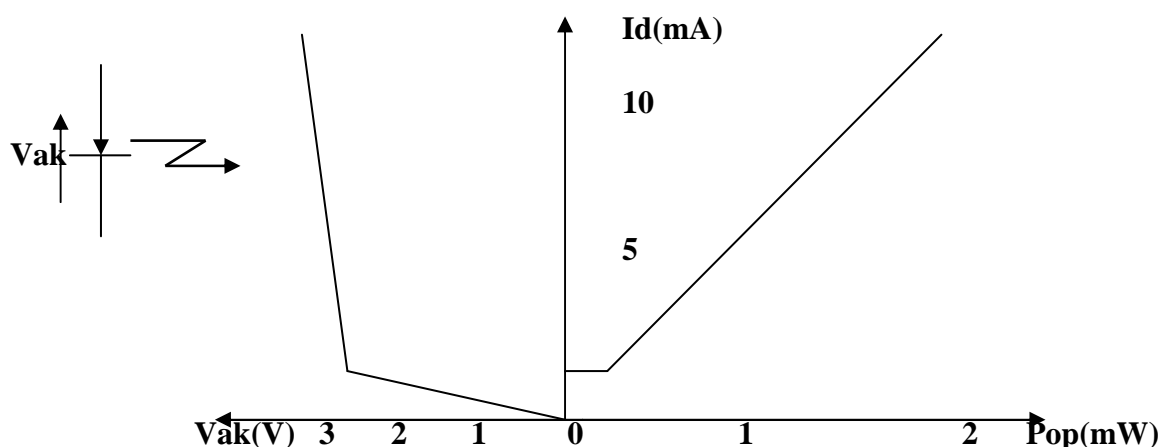
$I_r \cong \eta \cdot \Phi$ ou η est un rendement lié à la longueur d'onde, donc en clair la photoconduction ne fonctionne qu'à la bonne longueur d'onde ($E = h \cdot \nu$). Ici la formule est simplifiée et ignore le courant d'origine thermique, ou courant d'obscurité. **Si l'on avait polarisé la diode en directe le courant directe important aurait noyé le courant photoconducteur.**

Les matériaux actuellement utilisés sont arséniure de galium GaAs et cadmium tellure CdTe.

11-10 La source à effet photoémissif, ou électroluminescence :DEL.

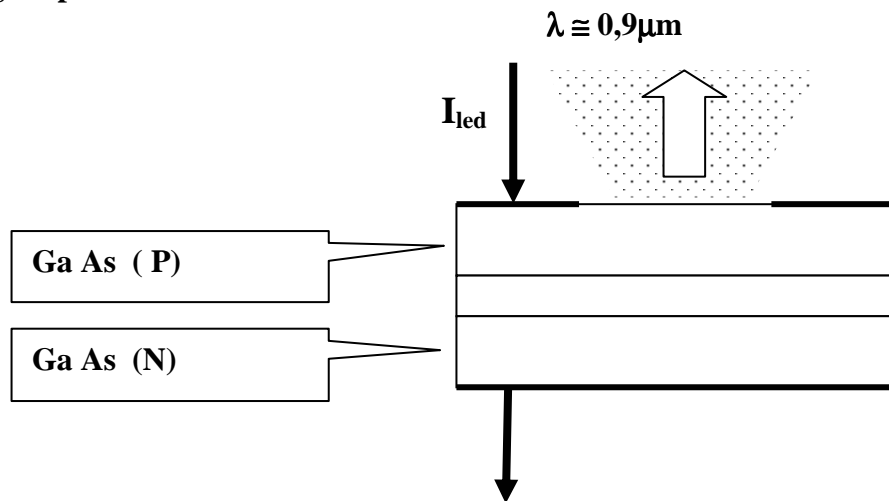
Ici les rôles sont inversés et on l'on utilise **une jonction activée en directe**, et c'est la recombinaison électrons trous qui provoque l'émission de photons, dont la fréquence ν dépend de E_{gap} , écart énergétique entre bande de conduction et de valence.

Le flux lumineux est proportionnel au courant directe injecté dans la diode électroluminescente.



Mais le flux émerge de la jonction dans toutes les directions, et malgré l'optique intégrée avec la jonction on ne canalise que peu de lumière dans la direction favorable à la pénétration dans la fibre.

Le rendement de couplage à la fibre est faible, ce qui est rédhibitoire pour les longues portées.



Les diodes électroluminescentes ne sont pas compatibles avec les fibres performantes monomodes car leur spectre n'est pas rigoureusement monochromatique et leur cône d'éclairement est très large.

Mais la diode électroluminescente est irremplaçable dans le matériel économique où l'on ne cherche pas la performance : affichage, témoin, isolation, source pour fibre basse gamme (petite distance et débit modeste) etc...

Par contre pour les applications professionnelles et notamment pour le transport à débits élevés et grandes distances on utilise l'effet photoémissif dans des structures sophistiquées, les Laser pour Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation.

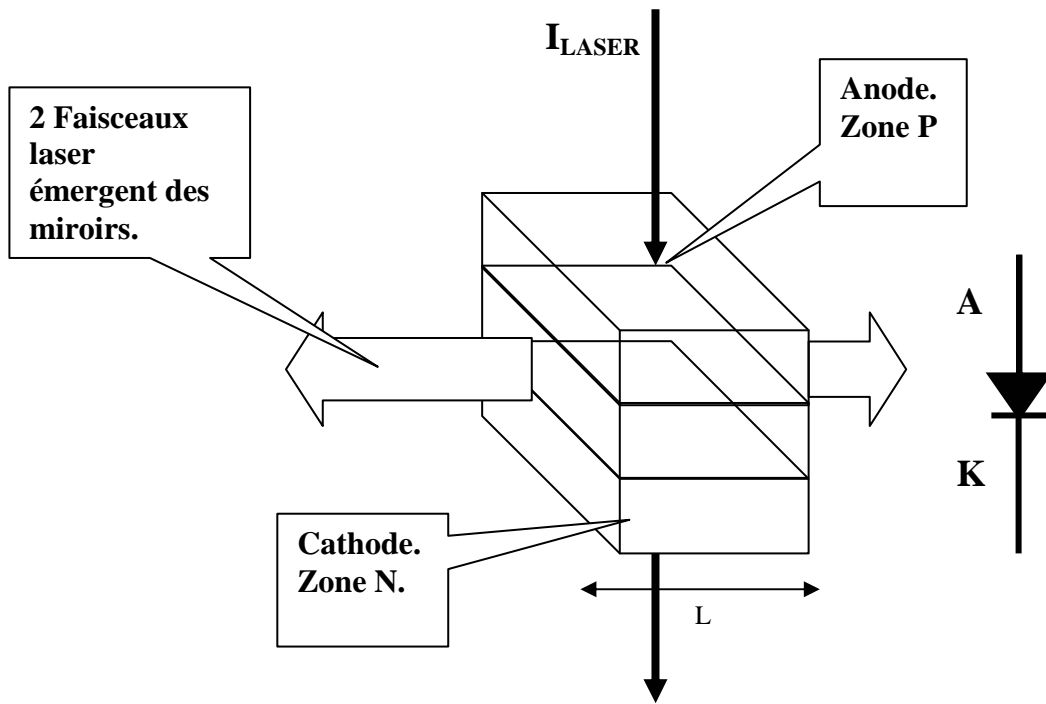
Il s'agit toujours d'une jonction électroluminescente où l'on fait cumuler un effet de résonateur optique et d'émission stimulée.

11-11 La source à émission stimulée ou Laser.

L'émission stimulée est l'émission par un électron préalablement excité (courant direct) recevant un photon et rémettant un photon. La recombinaison est associée par conséquent à l'émission de deux photons. Ces photons eux-mêmes vont provoquer d'autres émissions stimulées.

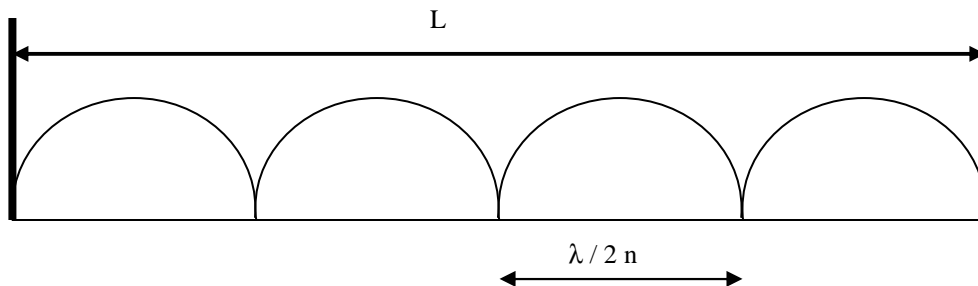
Ce mécanisme n'a lieu que pour de très fortes excitations, c'est à dire pour une densité de courant très élevée en kA/cm², par conséquent la jonction reçoit de l'extérieur énormément d'électrons libres, prêts à se recombinaisonner et à remettre des photons.

Le flux d'émission stimulée émerge dans les deux sens transversalement à la jonction.



On ajoute aux deux extrémités un miroir semi transparents ($r \sim 0,3$) parfaitement parallèles distant de $L = k n \lambda_p/2$ (k entier) Le résonateur à miroir parallèle est du aux opticiens Fabry et Pérot.

Cette structure Fabry et Pérot favorise le confinement des photons et par conséquent l'émission stimulée. Mais son avantage essentiel est de favoriser une seule longueur d'onde λ_p (ou presque).



De la structure de résonateur Fabry Pérot on obtient les avantages incomparables suivants :

Une excellente directivité du faisceau avant et du faisceau arrière.

Une émission précise en longueur d'onde ou monochromatique.

Un rendement photon/electron important.

Une puissance lumineuse importante et un bon couplage avec la fibre.

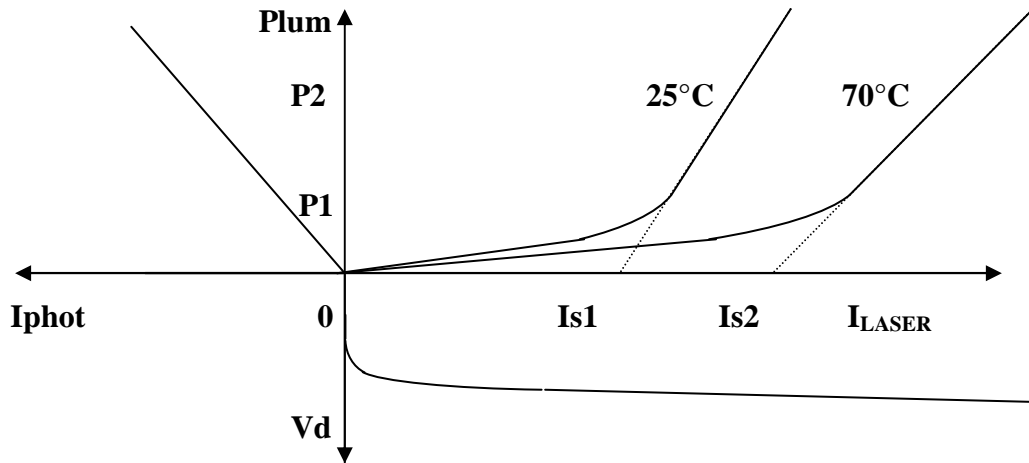
Ces 4 avantages sont ceux qui permettent l'illumination efficace des fibres monomode, seules exploitables aux grands débits sur grandes distances.

Mais ces qualités se paient par un contrôle délicat de la source laser. En effet la caractéristique est définie par deux paramètres, **le courant de seuil I_s et la pente P_{lum}/I_d** dans la zone d'émission stimulée.

En dessous de I_s le fonctionnement est celui d'une diode électroluminescente, au delà apparait l'émission stimulée dont le rendement optique est incomparable.

De plus ces deux paramètres dépendent fortement de la température de jonction :

Le laser est décrit dans le cadran 1 et le cadran 2.

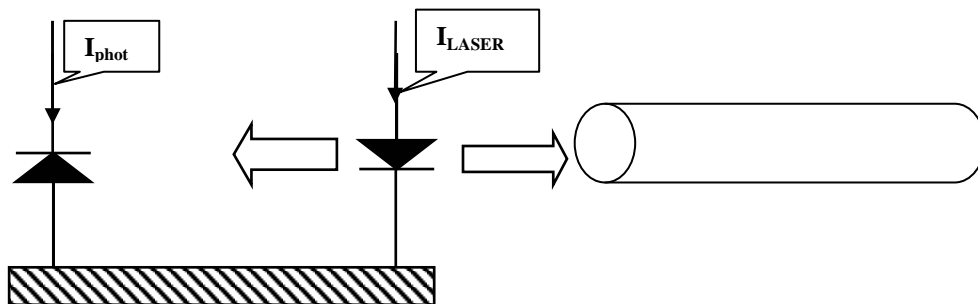


On note que le mode laser interdit l'extinction, à cause du temps d'allumage.

La modulation du laser nécessite la surveillance de la puissance optique moyenne $P_{moy} = (P1 + P2) / 2$ et du taux d'extinction $P2 / P1$.

Ceci est possible grâce à l'intégration en face arrière d'une photodiode dont la caractéristique est décrite en quadrant 4.

Actuellement l'ensemble laser, photodiode, surveillance et asservissement forment un module hybride de petit volume.



Il est intéressant de comparer diode électroluminescente et laser.

	LED	Laser
Puissance émise	1 mW	5 mW
Perte de couplage	- 17 dB	- 2 dB
Puissance transportée	20 μ W	3 mW
Modulation	100 MHz	10 GHz en amélioration
Temps de montée	10 ns	10 ps
Durée de vie	100 000 h	10 000 h

11-12 Le pilotage d'un laser.

Actuellement le pilotage proposé par les fabricants d'optoélectronique est de type dynamique avec contrôle sophistiqué de la puissance moyenne en température et alimentation.

Le taux de modulation est géré par surveillance du rapport Plum max / Plum min.

Le principe est illustré par le type de circuit suivant. :

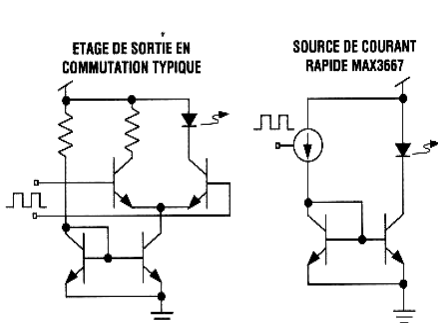


Figure 4. Divers étages de sortie pour émetteur laser

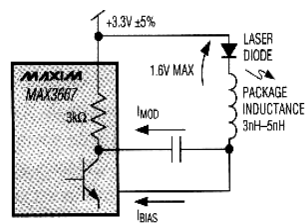


Figure 5. Courant de modulation avec couplage en alternatif

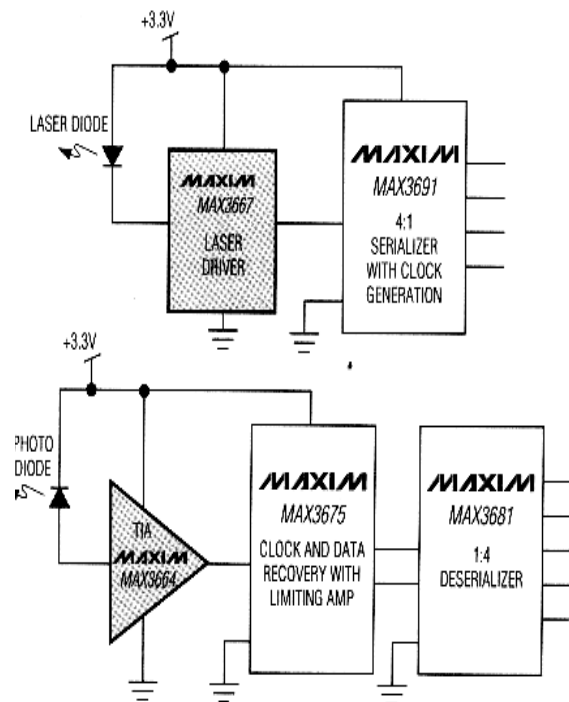


Figure 1. Le jeu de circuit de 622Mbit/s sous +3,3V de la société Maxim

11-13 L'état de l'art.

Depuis les années 90 on pose de plus en plus de câble optique en sous marin et en terrestre. Au début des années 90 un câble permettait environ 280 Mbits/s, soit 4000 communications téléphoniques.

En 2000 la capacité d'un câble dépassait 300 Gbits/s soit 4 000 000 communications téléphoniques.

Ceci est obtenu grâce à la technique de multiplexage en longueur d'onde Wavelength Domain Multiplex.

On développe la technique WDM dans les deux sens suivants :

Augmenter le débit de chaque canal en λ vers 40 Gbits/s.

.....le nombre de canaux en λ vers 100.

Exemple de système WDM pour liaisons transocéaniques (Source Alcatel) :

N = 32 longueurs d'onde régulièrement espacées de 1,6 nm ($D_n = 100\text{GHz}$) dans la fenêtre spectrale 1528-1568 nm.

Le débit binaire par canal est $B = 2,488$ Gbit/s et les régénérateurs sont espacés de 200 km.

La puissance d'un module d'émission est d'une dizaine de mW.

Plus généralement, les systèmes WDM (Source Alcatel) offrent une capacité potentielle de :

40 à 400 Gbit/s par paire de fibre et bientôt 680 Gbit/s, en fonction de la longueur de la liaison, en multiplexant de 8 à 40 canaux à 2,5 Gbit/s ou 10 Gbit/s chacun.

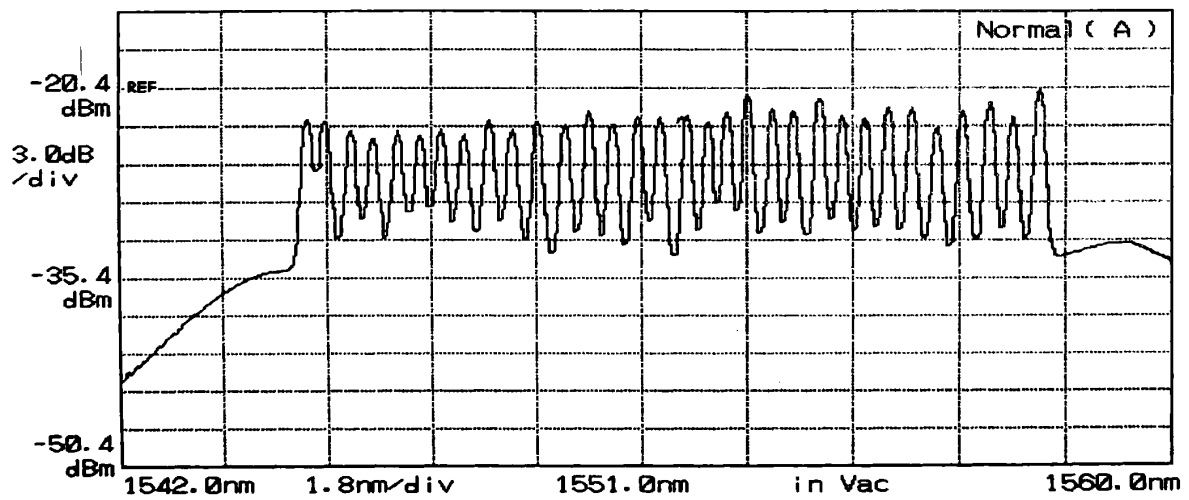
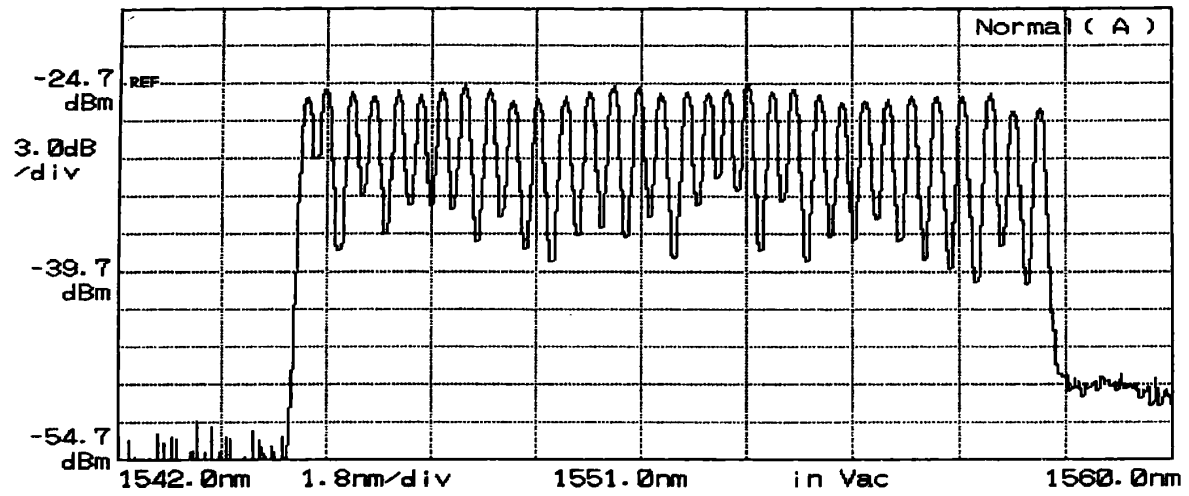
Un câble peut contenir jusqu'à 4 paires de fibres (et bientôt 8 paires), donc la capacité totale peut atteindre 1,6 Tbit/s.

En 2000 Alcatel Submarine Network obtenait le record suivant :




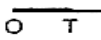










Sur une fibre passant 32 canaux espacés de 50 GHz, modulés à 10 Gbits/s, et sur une distance de 6150 km, on constate un TEB de 5.10^{-9} !

Ceci correspond à une capacité de 320 Gbits/s passant dans une bande optique de 12,4 nm !

Les spectres optiques à l'entrée et à la sortie de la fibre (6150 km) sont illustrés ci-dessous. Le rapport signal à bruit reste étonnamment bon. Les amplificateurs optiques (10 dBm) sont espacés de 50 km



11-14 Les formats possibles de commande du laser ou codes bande de base sur FO.

Code	Définition	Règle de codage		Largeur de bande à 90 % d'énergie
		«1»	«0»	
NRZ non-retour à zéro	«1» : niveau 1 sur tout l'intervalle. «0» : niveau 0 sur tout l'intervalle.			0,86/T
RZ retour à zéro	«1» : niveau 1 sur la première moitié de l'intervalle. «0» : niveau 0 sur tout l'intervalle.			1,72/T
BI φ - L biphase-L	«1» : niveau 1 sur la première moitié de l'intervalle. «0» : niveau 1 sur la deuxième moitié de l'intervalle.			2,96/T
BI φ-S biphase-S	«1» : une transition au début de l'intervalle. «0» : une transition au début et au milieu de l'intervalle.			2,96/T
CMI coded-mark-inversion	«1» : alternativement niveaux 1 et 0 sur tout l'intervalle. «0» : niveau 1 sur la première moitié de l'intervalle.			1,70/T
EP1 électronique photonique-1	«1» : alternativement niveaux 1 et 0 sur tout l'intervalle. «0» : une transition au milieu de l'intervalle.			1,52/T
EP2 électronique photonique-2	«1» : alternativement niveaux 1 et 0 sur tout l'intervalle. «0» : alternativement niveau 1 sur la 1ère et la 2e moitié de l'intervalle.			1,70/T

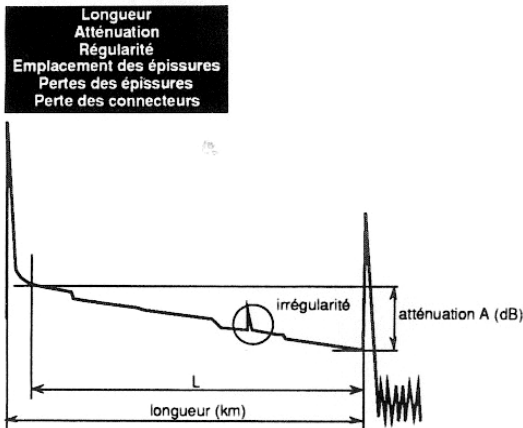
NB :Le code le plus utilisé est le CMI.

11-15 Vérification d'une liaison FO par réflectométrie :

QUANTIFIER UNE LIAISON

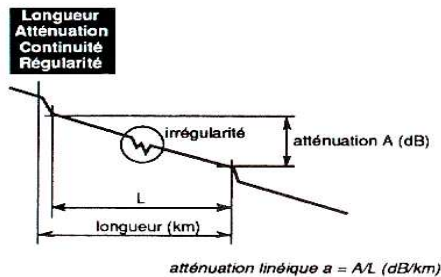
Lorsqu'un système de transmission optique est installé, il est impératif de vérifier que la liaison ainsi constituée répond au cahier des charges. Atténuation globale, longueur "optique", perte des connecteurs d'extrémité, etc, le réflectomètre est indispensable pour mesurer tous ces paramètres.

Nota: Le bilan de liaison (représentant la perte entre les équipements de transmission) ne peut pas être mesuré avec un réflectomètre.



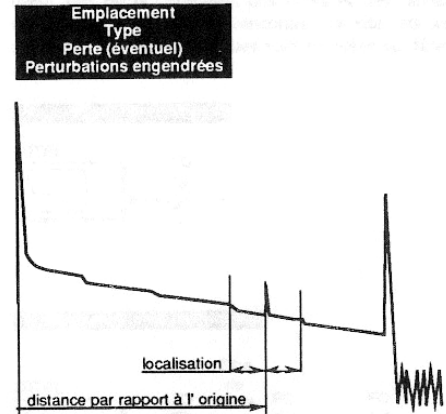
QUANTIFIER UNE FIBRE

Que ce soit en usine, lors de la fabrication de la fibre ou du câble optique, ou sur site, après le déroulage du câble par exemple, on a besoin de connaître les caractéristiques des fibres, pour les qualifier ou analyser d'éventuelles variations. Le réflectomètre est employé pour mesurer l'atténuation, l'atténuation linéique, la longueur, la continuité et l'allure (la régularité) des fibres optiques.



LOCALISER UN DÉFAUT

Le réflectomètre est le seul instrument permettant de déterminer avec précision l'emplacement et la nature d'un défaut présent sur la fibre.



QUANTIFIER UNE EPISSURE

Dans une liaison optique, les joints sont des éléments incontournables, puisqu'il faut bien raccorder les longueurs de câbles entre elles, mais sont aussi des éléments perturbateurs car ils apportent généralement une perte supplémentaire dans l'atténuation totale de la liaison, et pour certains types d'épissurage (les collages ou les connecteurs collés), engendrent des perturbations dans la transmission des signaux à cause des réflexions importantes qu'ils créent. Le réflectomètre est le seul instrument de mesure permettant l'analyse de ces éléments sur une liaison installée.

