

Chapitre 4.4 - APPLICATIONS des LASERS à la COMMUNICATION et au TRAITEMENT de l'INFORMATION

4.4.1 - INTRODUCTION

La photonique présente plusieurs avantages dans le domaine des communications :

- les fréquences porteuses très élevées (10^{14} à 10^{15} Hz) offrent une largeur de bande considérable et permettent la transmission simultanée d'un grand nombre de messages,
- le rayonnement est insensible aux parasites électromagnétiques,
- les fibres optiques qui sont utilisées pour guider le rayonnement, sont légères, peu encombrantes, électriquement neutres et sont fabriqués à partir de matériaux peu onéreux.

L'invention du maser, puis du laser, a été d'ailleurs motivée par le besoin, existant après la dernière guerre, de développer de nouveaux canaux de communication offrant plus de capacités et plus de sécurité que les liaisons hertziennes. L'apparition du laser en 1960 n'a résolu que l'un des aspects du problème, celui de la source de rayonnement; il a fallu attendre la fin des années 70, pour disposer d'un milieu de transmission à faible atténuation et qui ne déforme pas le signal optique transmis. Au cours de la même période, des composants d'extrémités (connecteurs, détecteurs, ...) ont été développés et au cours des années 80, les premiers systèmes photoniques de communication et de traitement de l'information ont pu être installés. La lumière joue déjà un rôle important dans la transmission et la lecture d'informations ; il est prévisible que le XXIème siècle verra son utilisation dans le traitement direct des informations.

Les principaux composants d'une liaison photonique sont :

- la source de rayonnement (diode électroluminescente ou diode laser),
- le modulateur,
- le milieu de transmission (fibre optique),
- le détecteur suivi d'un démodulateur. Parmi ces éléments, certains, comme la fibre optique, ont déjà des performances proches des limites théoriques. D'autres, comme les sources et les détecteurs continuent d'évoluer. Il est déjà possible de transmettre environ 10^9 bits sur 100 km sans régénération du signal. On peut s'attendre d'ailleurs à ce que les systèmes se miniaturisent et que leurs performances continuent à s'améliorer. La plupart des fonctions actuellement assurées par l'électronique peuvent déjà être réalisées par voie optique et il est devenu possible d'intégrer un certain nombre de composants sur un même substrat, à l'image de ce qui a été fait en électronique. L'optique intégrée est un domaine en plein essor.

Le laser est un composant essentiel des systèmes optiques de communication. Il est utilisé comme source du rayonnement porteur des informations mais le laser est utilisé également pour la lecture d'informations, soit sous forme numérique (vidéodisque par exemple), soit sous forme analogique (lecture de codes à barres).

Le laser est également utilisé pour l'écriture. L'utilisation de lasers dans les imprimantes a permis de diminuer le nombre de pièces en mouvement et d'augmenter la rapidité de l'impression par rapport aux imprimantes mécaniques.

4.4.2 LIAISONS OPTIQUES.

4.4.2.1 - FIBRES OPTIQUES

L'idée d'utiliser une fibre en silice pour véhiculer des informations date de 1966 et a été émise par Kao et Hockam [Kao.66]. Il a fallu cependant attendre jusqu'à 1976 pour que les liaisons optiques deviennent une réalité, puisque c'est à partir de cette époque qu'on a su fabriquer des matériaux à très faible absorption dans le visible et dans le proche infrarouge.

4.4.2.1.1 - Caractéristiques géométriques des fibres optiques

La structure d'une fibre optique est représentée sur la figure 1. La partie centrale, ou **cœur** de la fibre a un indice de réfraction n_c légèrement supérieur à l'indice n_g de la structure qui l'entoure, appelée **gaine**.

L'**angle d'admission** (angle θ sur la figure) à l'entrée est l'angle au sommet du cône qui contient tous les rayons guidés, c'est-à-dire les rayons dont l'angle d'incidence à l'interface cœur-gaine est supérieur à l'angle de réflexion totale interne.

Ouverture Numérique de la fibre (O.N.) : Les rayons guidés dans le cœur sont ceux dont l'angle d'inclinaison par rapport à l'axe de la fibre est inférieure à $\theta/2$ tel que

$$(4.4-1) \quad \frac{\theta}{2} = \arcsin \left(\sqrt{\frac{n_c^2 - n_g^2}{n_0^2}} \right)$$

n_0 est l'indice de réfraction du milieu à l'entrée de la fibre. L'ouverture numérique est définie par la relation :

$$(10-1) \quad \text{ON} = \sin \frac{\theta}{2} \quad (\approx \sqrt{n_c^2 - n_g^2} \text{ lorsque le milieu à l'entrée est l'air).}$$

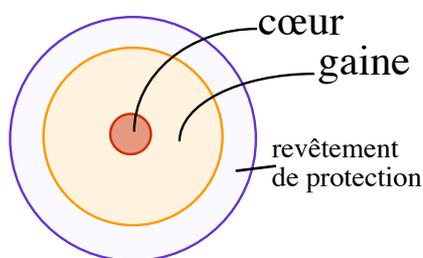
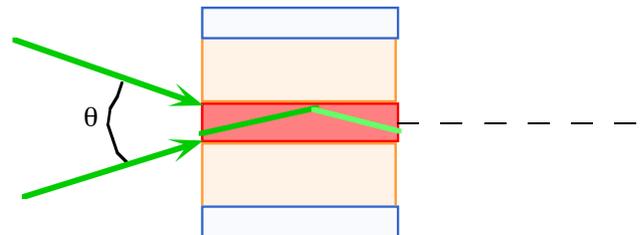


Fig. 4.4-1 : Fibre optique.

a) Fibre optique. Coupe transverse.



b) Fibre optique. Coupe longitudinale.

Seuls les rayons entrant dans la fibre à l'intérieur d'un cône d'angle θ , sont guidés.

Le rayonnement se propage dans le cœur.

L'ouverture numérique définit la capacité de la fibre de collecter la lumière émise par une source. En sortie de fibre, on observe un faisceau lumineux dont la divergence est de 10 à 20 % plus faible que celle du faisceau admis à l'entrée. Cette diminution de la divergence s'explique par une atténuation plus forte pour les rayons les plus inclinés.

On utilise parfois le paramètre $\Delta = \frac{n_c - n_g}{n_c}$ pour caractériser la différence d'indice entre le cœur et la gaine. On obtient alors une autre expression pour l'ouverture numérique :

$$(4.4-2) \quad \text{ON} = n_c \sqrt{2\Delta}$$

4.4.2.1.2 - Profils d'indice et modes de propagation

Profils d'indice.

Les performances de fibres dépendent de la distribution d'indice dans le cœur.

On distingue les fibres à saut d'indice pour lesquelles l'indice de cœur est homogène et les fibres à gradient d'indice dont l'indice de cœur varie de la valeur de l'indice de gaine à l'interface cœur-gaine à une valeur maximale sur l'axe de la fibre.

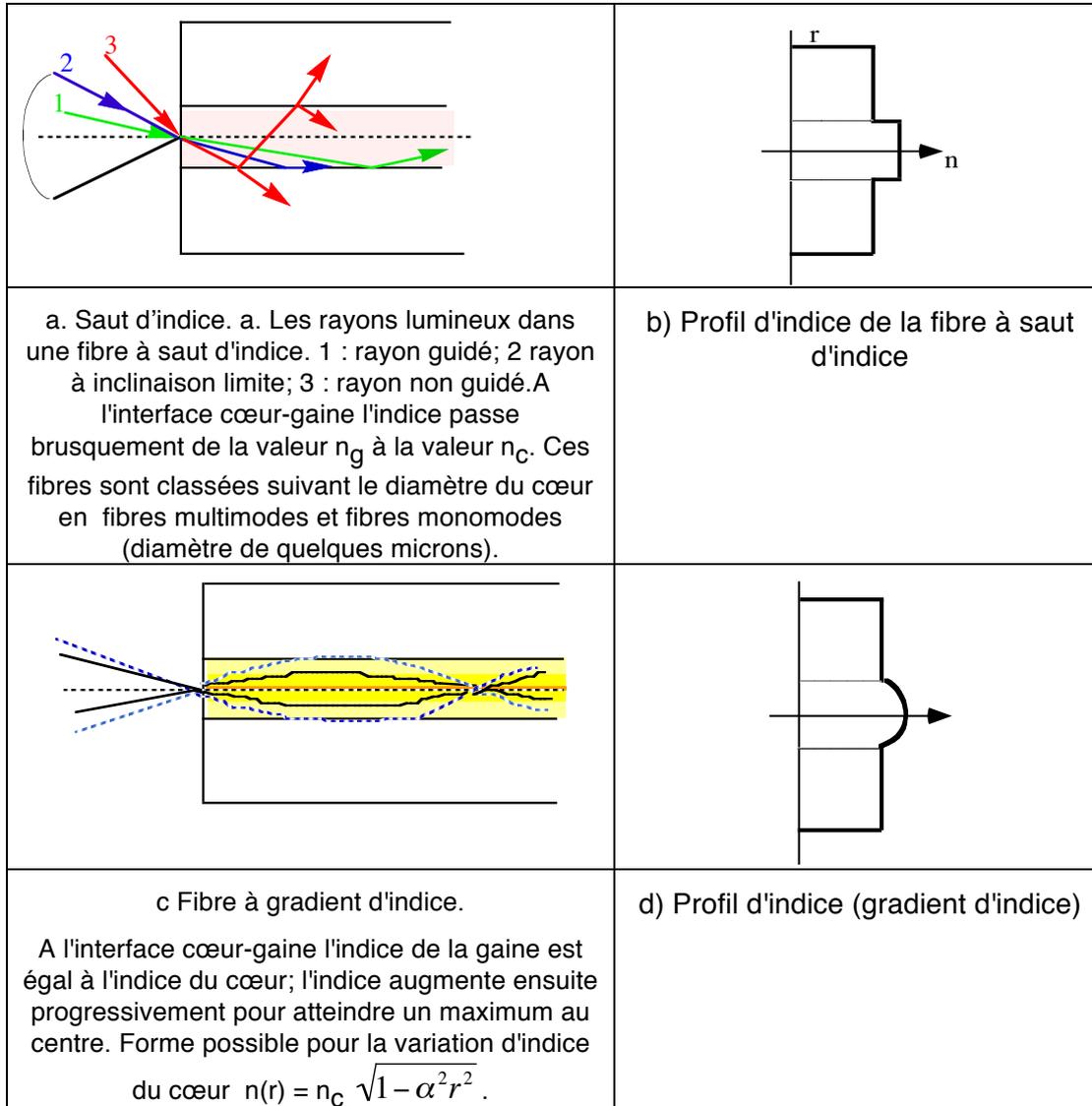


Fig. 4.4-2 : Fibre optique : propagation des rayons dans le cœur et profil d'indice.

Modes de propagation.

Le milieu de dimensions limitées que constitue le cœur d'une fibre impose des contraintes aux ondes qui s'y propagent. Comme dans les cavités des lasers, seules certaines configurations du champ électromagnétique (ou modes de propagation) peuvent exister à l'intérieur de la fibre. L'application des équations de propagation des ondes ém à un guide plan fait apparaître des distributions stables du champ comprenant 1 ou plusieurs maximums (figure ci-après).

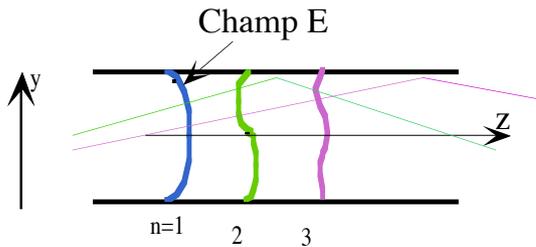


Fig. 4.4-3 : Variation du champ électrique de quelques modes de propagation du rayonnement dans une fibre optique.

Les modes sont caractérisés par un paramètre V tel que :

$$(4.4-3) \quad V = n_1 k a \sqrt{2\Delta} \quad \text{où } \Delta \text{ est la mesure de la différence d'indice } (\Delta \approx \frac{n_c - n_g}{n_c}).$$

Le nombre de modes est donné par :

$$(4.4-4) \quad N = 1/2 V^2.$$

La distribution la plus simple de champ est observée dans les fibres de très petit diamètre (voisin de la longueur d'onde) dans lesquelles un mode unique peut se propager. Ces fibres sont dites monomodes.

En pratique, on distingue :

- > les fibres monomodes (en général à saut d'indice)
- > les fibres multimodes à saut d'indice

Le nombre de modes est donné par l'expression suivante :

$$(4.4-5) \quad N = 2\pi^2 \frac{a^2}{\lambda^2} (n_c^2 - n_g^2)$$

- > les fibres multimodes à gradient d'indice
- > les fibres monomodes à cœur elliptique pour la conservation de polarisation,
- > les fibres à cœur creux,
- > les fibres en matière plastique (atténuation importante de l'ordre du dB/m).
- > les fibres à grand diamètre (200 à 1800 μm) de cœur, utilisées pour le transport de faisceaux laser de grande puissance.

Les fibres optiques peuvent être assemblées en câbles de 2 à 10 fibres ou plus; dans ces câbles, la résistance à la traction est assurée par un fil métallique.

4.4.2.1.3 - Atténuation

L'atténuation du signal photonique par une fibre est due aux impuretés laissées dans la fibre au cours de la fabrication. Aux pertes de propagation, il faut ajouter les pertes à l'entrée, à la sortie et aux connexions, ainsi que les pertes dues aux courbures de la fibre (négligeables pour des rayons de courbure supérieurs à 10 cm).

L'atténuation est une fonction de la longueur d'onde. La figure ci-après montre l'allure de la courbe de variation spectrale de l'atténuation pour le verre et fait apparaître les limites fondamentales liées à la *diffusion Rayleigh* et à l'absorption dans l'infrarouge. Par un heureux hasard, les sources de rayonnement disponibles (DEL et diodes laser) ainsi que les détecteurs présentent leurs meilleures performances aux fenêtres d'atténuation minimale du verre.

Plusieurs phénomènes contribuent à l'atténuation du rayonnement dans une fibre optique. La diffusion Rayleigh est une propriété intrinsèque du matériau de cœur et varie proportionnellement à λ^{-4} . Les impuretés ioniques (OH^+ en particulier) et les vibrations moléculaires contribuent à l'absorption dans l'infrarouge.

Dans une fibre dont le facteur d'atténuation par unité de longueur est égal à α , la puissance du rayonnement varie suivant la relation :

$$(4.4-6) \quad P(z) = P_i \exp(-\alpha z)$$

où P_i est la puissance injectée dans la fibre. L'atténuation d'une fibre exprimée en dB/km est obtenue par la relation :

$$(4.4-7) \quad \alpha \text{ (en dB/km)} = \frac{10}{L(\text{km})} \log \left(\frac{P_i}{P_s} \right), \quad P_s \text{ étant la puissance à la sortie de la fibre.}$$

La figure 4 montre l'allure de la courbe de variation spectrale de l'atténuation pour le verre et fait apparaître les limites fondamentales liées à la diffusion Rayleigh et à l'absorption IR. L'atténuation présente un minimum pour trois fenêtres centrées sur les longueurs d'onde suivantes : 0,85 μm , 1,3 μm et 1,5 μm .

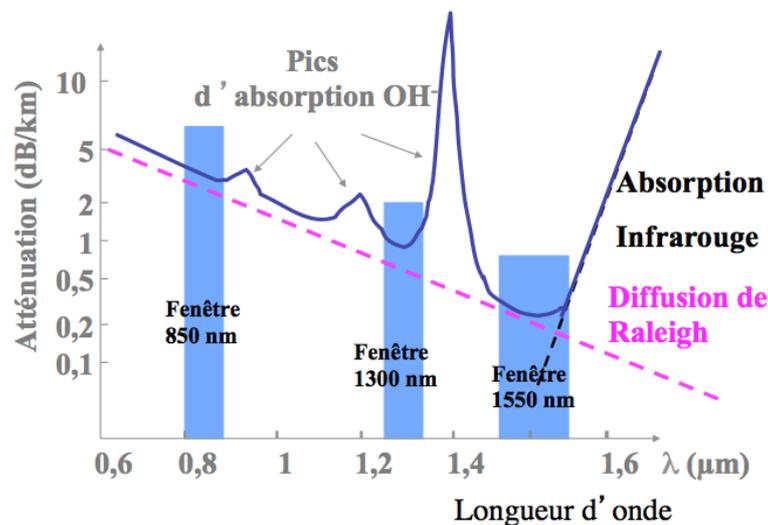


Fig. 4.4-4 : Courbe d'atténuation du verre en fonction de la longueur d'onde. Trois fenêtres de transmission apparaissent : à 850nm, à 1300 nm et à 1550 nm.

En pratique, on observe dans les fibres à saut d'indice en verre, une atténuation de quelques dB/km. Les fibres en plastique présentent une atténuation beaucoup plus importante de l'ordre du dB par mètre.

4.4.2.1.4 - Dispersion

Il faut distinguer les deux termes suivants pour la dispersion :

- la dispersion du matériau (l'indice et donc le chemin optique est une fonction de la longueur d'onde),

- la dispersion modale (les rayons peu inclinés par rapport à l'axe de la fibre, parcourent un chemin moins long que les rayons fortement inclinés). La dispersion provoque un allongement des impulsions (exprimée en ns/km) se propageant dans la fibre et limite la bande passante (exprimée en MHz.km) du signal qui peut être transmis.

Dans les fibres multimodes, la dispersion est surtout modale, les modes d'ordre supérieur étant beaucoup plus lents que le mode axial. Le décalage Δt entre les temps de propagation de deux rayons extrêmes dans une fibre d'ouverture numérique ON, de longueur L et d'indice de cœur n_c est donné par l'expression :

$$(4.4-8) \quad \Delta t = \frac{n_c L}{2 c} \left(\frac{\text{ON}}{n_c} \right)^2$$

Le décalage Δt correspond à l'allongement subi dans la fibre par une impulsion courte. La bande passante de la fibre est sensiblement égale à

$$(4.4-9) \quad \frac{1}{2 \Delta t}.$$

Les fibres à gradient d'indice ont une dispersion modale faible. Pour un diamètre de cœur donné une fibre à gradient d'indice est moins dispersive qu'une fibre à saut d'indice et déforme moins les impulsions lumineuses. La bande passante d'une fibre à gradient d'indice est d'environ 1 GHz.km.

Dans les fibres monomodes, il n'y a que la dispersion du matériau qui intervient pour déformer les impulsions lumineuses. Il en résulte que les fibres monomodes sont les plus performantes du point de vue de la capacité de transmission. L'utilisation d'un rayonnement à 1330 nm permet de minimiser cette dispersion et d'atteindre des capacités de transmission de l'ordre du milliard de bits d'information par seconde sur des distances d'environ 100 km.

Dans le but d'augmenter la capacité de transmission, les chercheurs ont développé des dispositifs à solitons (impulsions qui ont la propriété de ne pas se déformer au cours de la propagation dans une fibre). Les impulsions se comportent en solitons si leur puissance crête est suffisante pour induire une réponse non linéaire de la fibre dans laquelle elles se propagent.

Type de fibre	Monomode	Multimode à saut d'indice	Multimode à gradient d'indice
Diamètre de cœur(μm)	2 à 8	50 à 300	60 à 90
Diamètre de gaine(μm)	15 à 50	125 à 450	125
Atténuation(dB/km)	0,2 à 2	10 à 50	7 à 15
BP(MHz.km)	5000 à 100 000	20 à 50	200 à 400
ON	0,12	0,22 à 0,48	0,16 à 0,21

Caractéristiques des fibres courantes

Exemples de caractéristiques commerciales de fibres optiques (Fibres Optiques Industries)

Fibre optique multimode à saut d'indice 'silice –silicone'

Longueur standard	2,5 km
Diamètre de cœur	200+/- 8 μm
Diamètre de gaine	380+/-30 μm
Excentricité cœur-gaine	20 μm
Diamètre du revêtement	600+/-48 μm
Matériau de revêtement	ETFE clair
Ouverture numérique	0,4
Réponse en bande passante à 0,85 μm	10 MHz.km
Atténuation à 0,85 μm	10 dB/km
Test de résistance mécanique	0,32 GPa

Longueur standard	2,5 km
Diamètre du revêtement	205+/-15 μm
Ouverture numérique	0,200 +/- 0,015
Réponse en bande passante à 0,85 μm	200 MHz.km
Test de résistance mécanique	0,4 GPa

Fibre optique multimode à gradient d'indice

4.4..2.2 - COMPOSANTS ASSOCIÉS AUX FIBRES OPTIQUES : ÉMETTEURS, CONNECTEURS; MODULATEURS, RÉCEPTEURS, RÉPÉTEURS.

4.4.2.2.1 - Émetteurs.

Les sources de rayonnement ou émetteurs, utilisées dans les communications optiques sont, soit des diodes électroluminescentes (DEL), soit des diodes laser (DL). Le tableau ci-après donne quelques caractéristiques de ces deux types de sources.

Diodes électroluminescentes

Les diodes électroluminescentes existent également sous diverses formes, l'émission lumineuse se faisant soit par la surface au-dessus de la jonction (type Burrus) soit par la tranche (Figure).

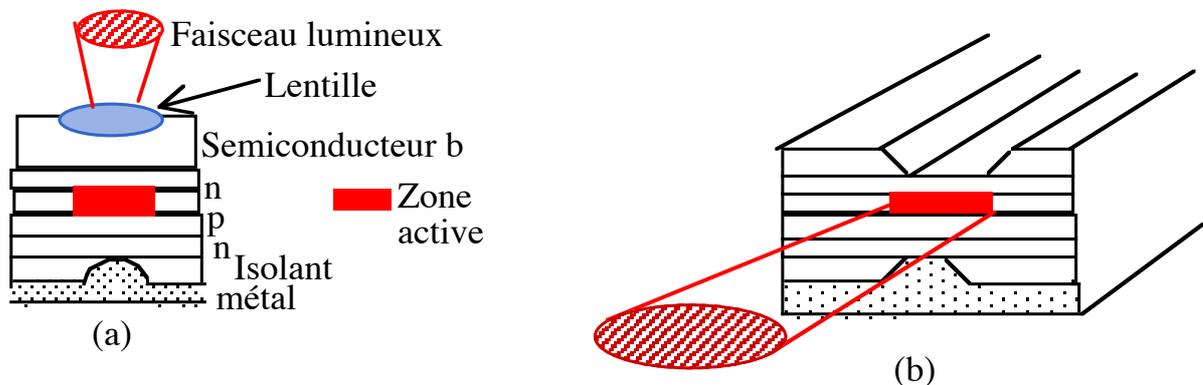


Fig. 4.4-5 : Structure des diodes électroluminescentes.

(a) : DEL type Burrus; (b) : DEL à émission de surface.

Efficacité de couplage du rayonnement d'une DEL dans une fibre. L'efficacité de couplage est définie comme le rapport P_i/P_t , où P_i est la puissance incidente dans le cône d'admission de la fibre et P_t , la puissance totale émise par la DEL. Les DEL sont en général munies d'une lentille de collimation du rayonnement qui permet d'améliorer le couplage dans une fibre optique. L'efficacité de couplage est comprise entre 1 et 10 %.

Les longueurs d'onde les plus fréquemment rencontrées sont: 565 nm (vert), 660 nm (rouge), 900, 1300 et 1500 nm (IR). Les longueurs d'onde comprises

entre 800 et 900 nm, et autour de 1100 nm conviennent le mieux aux transmissions par fibre optique; à ces longueurs d'onde, en effet, la dispersion et les pertes par absorption sont faibles.

L'utilisation de DEL pour la transmission d'informations permet des bandes passantes pouvant atteindre 100 MHz. On les utilise pour des liaisons courtes et de faible débit: BP de 10 MHz ou 20 Mbits/s et distances inférieures au kilomètre. Lorsque des caractéristiques supérieures sont recherchées, l'utilisation de diodes laser doit être envisagée.

- Diodes laser.

Les performances de diodes laser dépendent de la complexité de leur structure (voir Ch. V). Il existe des diodes à simple hétérojonction et des diodes à double hétérojonction. Les premières fournissent la puissance mentionnée ci-dessus de 10 mW mais avec des intensités crête de courant de 10 à 30 A. Dans les secondes, pour des caractéristiques de puissance équivalente, une intensité crête de 0,1 à 0,4 A suffit.

Il existe des diodes pour différentes longueurs d'onde : entre 0,75 et 0,9 μm , 1,3 μm , 1,55 μm . Les liaisons à 1,3 et 1,5 μm permettent des transmissions sur de plus grandes distances (dizaines de kilomètres) grâce à une atténuation plus faible à ces longueurs d'onde.

	Diode électroluminescente	Diode Laser
Puissance émise	0,5 à 1,5 mW	3 à 10 mW
Largeur spectrale	25 à 50 nm	0,1 à 5 nm
Temps de montée du signal	3 à 20 ns	1 à 2 ns
Intensité du courant de pompage	50 à 100 mA	100 à 500 mA
Efficacité de couplage dans une F.O.	médiocre	excellente

Tableau comparatif des caractéristiques d'une DEL et d'une DL

- Connecteurs.

Les connections de fibres optiques sont sensibles à l'alignement des extrémités ainsi qu'à leur qualité de surface. Les pertes typiques sont de l'ordre du dB. Dans le cas d'une liaison fixe, on peut également réaliser une connexion définitive (ou épissure) par fusion de la fibre; les pertes de connexion peuvent alors être aussi faibles que 0,2 dB.

- Détecteurs.

- Photodiodes : Bonne linéarité, rapidité, stabilité mais faible gain.
- Photodiodes PIN : une couche en semi-conducteur intrinsèque permet de réduire la capacité de la diode et d'augmenter la réponse en fréquence (jusqu'à 1 GHz); peu coûteuse et facile à mettre en œuvre.
- Photodiodes à avalanche : Gain de 50 à 500 mais tension de polarisation élevée (100 à 300 V), sensible à la température.
- Phototransistor -> Gain important, mais réponse lente (2 μs de temps de montée); Sensibilité : 30 $\mu\text{A}/\mu\text{W}$

	PIN	Photodétecteur à avalanche	Photo transistor	Photo Darlington
Sensibilité ($\mu\text{A/W}$)	0,5	15	35	180
Temps de montée (s)	10^{-9}	$2 \cdot 10^{-9}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$40 \cdot 10^{-6}$
Tension de polarisation(V)	10 à 50	-100 à - 300	10	10

Quelques caractéristiques de détecteurs utilisés dans les liaisons optiques.

- Modulateurs

Les signaux utilisés dans les liaisons photoniques sont constitués d'une série d'impulsions. Ces impulsions sont en général obtenues par modulation du courant d'excitation de la source.

Une modulation d'amplitude ou de phase d'un signal photonique continu peut être obtenue à l'aide d'un dispositif acousto-optique ou électro-optique (voir Ch VII).

- Répéteurs

Dans les liaisons à grande distance, il est nécessaire d'introduire des dispositifs pour reconstituer le signal. Ces répéteurs, placés tous les 5 à 10 km, sont constitués d'une photodiode, d'un système de remise en forme des impulsions et d'une diode émissive.

Dans les liaisons du futur, l'amplification se fera sans doute de façon continue, grâce aux fibres dopées à l'erbium développées récemment.

- Coupleurs

Les coupleurs servent à dévier le signal photonique d'une fibre vers une autre fibre.

4.4..2.3 - LIAISON OPTIQUE

4.4.2.3.1 - Composants et caractéristiques d'une liaison optique.

Une liaison optique est composée des principaux éléments suivants : une source de rayonnement, un modulateur, une ou plusieurs fibres optiques assemblées par des connecteurs, des étages de régénération du signal, un détecteur, un démodulateur.

Les caractéristiques de l'émetteur (diode électroluminescente ou diode laser) sont les suivantes:

- Longueur d'onde d'émission;
- Largeur spectrale (monomode ou multimode -> Bande Passante);
- Relation entre puissance émise et courant injecté;
- Diagramme de rayonnement (Ouverture Numérique);
- Temps de montée et de décroissance du signal;
- Surface émissive;
- Durée de vie;

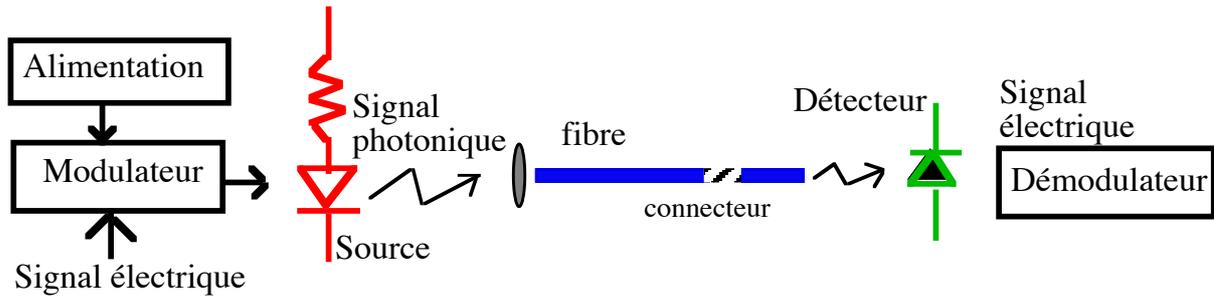


Fig. 4.4-6 : Schéma d'une liaison à fibre optique.

E: Émetteur (diode électroluminescente ou diode laser); C: connecteur; D: détecteur (photodiode à avalanche ou photodiode PIN).

La fibre optique est caractérisée par:

- Diamètre de coeur;
- Diamètre de gaine;
- Ouverture numérique;
- Atténuation en fonction de la longueur d'onde;
- Fonction de transfert (ou bande passante).

On peut encore ajouter les caractéristiques liées aux conditions d'environnement: température, humidité, contraintes mécaniques sur les fibres ainsi que la tenue des fibres aux rayonnements X et γ .

Le module récepteur est caractérisé par:

- sensibilité spectrale;
- surface sensible;
- gain;
- bruit (Puissance Équivalente de Bruit);
- temps de montée et de descente (-> Bande Passante).

Les connecteurs et épissures sont caractérisés par:

- leurs pertes.

Les pertes d'un connecteur dépendent essentiellement de l'état de surface des extrémités des fibres ainsi que de l'alignement; elles sont de l'ordre du dB. Les liaisons par soudure, ou épissure ont des pertes de l'ordre de 0,2 dB.

La liaison dans son ensemble sera caractérisée par :

- la longueur,
- le taux d'erreur,
- la bande passante.

4.4.2.3.2 - Liaison optique : Bilan de liaison.

Deux facteurs limitent la longueur de la liaison :

- d'une part l'atténuation (la puissance de l'émetteur doit être suffisante pour que le niveau du signal reçu par le détecteur soit supérieur au bruit),
- d'autre part , la dispersion (les impulsions ne doivent pas se recouvrir en sortie).

La limitation introduite par l'atténuation dépend des paramètres suivants :

- la puissance injectée dans la fibre,
- l'atténuation par unité de longueur de fibre,
- l'atténuation des connections,
- le niveau minimum nécessaire sur la photodiode.

La puissance injectée dans la fibre ou transmise par celle-ci est souvent exprimée en dBm; la relation suivante définit les dBm.

$$(4.4-10) \quad P(\text{dBm}) = 10 \log \left(\frac{P_s(\text{en mW})}{1 \text{ mW}} \right)$$

Une puissance de 0 dBm correspond à 1 mW. La figure 10 montre un exemple de performances d'une liaison en fonction des éléments choisis.

Bande passante (BP) et Capacité de transmission (CT) [Pourp.90]

La portée de transmission d'une liaison optique peut être également limitée par la bande passante. On évalue cette limitation en prenant en compte les paramètres suivants de la fibre :

- l'élargissement d'une impulsion $\Delta\tau$ (en ns.km⁻¹),
- la bande passante (BP) pour un signal analogique (en MHz.km) ou
- la capacité de transmission (CT) (en Mbits.s⁻¹.km) pour un signal numérique.

Afin de définir des relations entre les paramètres ci-dessus, il est utile de considérer la liaison optique comme une série de quadripôles qui transforment une grandeur $e(t)$ (le signal d'entrée) en une grandeur $s(t)$ (le signal en sortie) (figure ci-après).

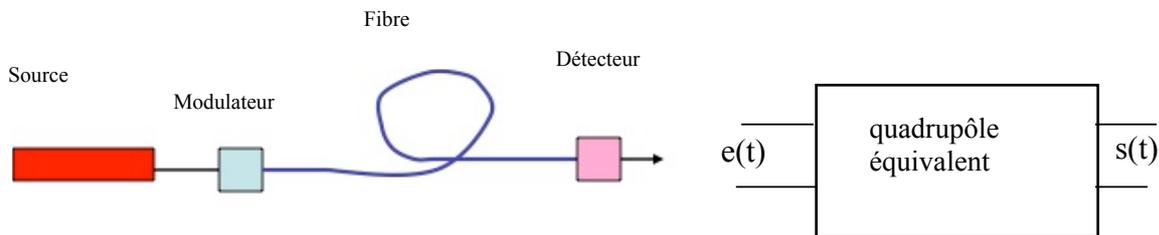


Fig. 4.4-7 : Une liaison optoélectronique peut être considérée comme une suite de quadripôles (a) qui transforment un signal $e(t)$ en un signal $s(t)$. L'ensemble de la liaison peut être assimilée à un quadripôle unique (b).

Les caractéristiques spectrales du quadripôle sont obtenues en considérant le spectre des signaux d'entrée et de sortie. On passe du signal temporel $s(t)$ au spectre par la transformation de Fourier ($\Omega = 2\pi f$ est la pulsation du signal considéré) :

$$(4.4-11) \quad S(\Omega) = \text{TF}[s(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \exp(-j\Omega t) dt, \text{ et inversement :}$$

$$(4.4-12) \quad s(t) = \text{TF}^{-1}[S(\Omega)] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\Omega) \exp(+j\Omega t) dt.$$

On montre [Gasquet, 1990], que le spectre du signal de sortie est obtenu à partir de celui du signal d'entrée par la relation

$S(\Omega) = Q(\Omega) \cdot E(\Omega)$; $Q(\Omega)$ est la fonction de transfert (ou réponse fréquentielle) du quadripôle. La fonction de transfert est obtenue en sortie, lorsqu'on injecte à l'entrée une impulsion infiniment courte (impulsion de Dirac).

Une fibre optique est assimilable à un filtre passe-bas. En prenant en 1ère approximation la fonction de transfert indiquée sur la figure ci-après, on peut obtenir la réponse impulsionnelle de la fibre en prenant la TF de $F(\Omega)$, ce qui donne la fonction $f_1(t)/f_1(t_0)$ représentée sur la figure (b) ci-après. t_0 correspond à la durée moyenne du passage de l'impulsion à travers la fibre; $\Delta\tau$ est l'élargissement de l'impulsion dû à la dispersion (la durée de l'impulsion d'entrée étant considérée comme négligeable).

La bande passante (BP) est donnée par $BP \approx \frac{\Omega_c}{2\pi} = f_c$; sur le dessin 8.b, la largeur $\Delta\tau$ de la courbe à mi-hauteur étant peu différente de $0,5 \frac{2\pi}{\Omega_c}$, on peut écrire la relation suivante entre BP et $\Delta\tau$:

$$(4.4-13) \quad \boxed{\Delta\tau \times BP \approx 0,5}$$

Le paramètre $\Delta\tau$ varie linéairement avec la longueur de la fibre :

$\Delta\tau$ (pour fibre de longueur L) = $\Delta\tau$ (pour fibre de 1 km) x L (en km). En conséquence la bande passante d'une fibre varie comme l'inverse de sa longueur :

$$(4.4-14) \quad BP \text{ (pour une fibre de longueur L)} = \frac{BP \text{ (pour fibre de 1 km)}}{L \text{ (en km)}}$$

Une relation entre la dispersion et la capacité de transmission peut être trouvée en considérant le signal numérique de la figure suivante formée d'une suite d'impulsions carrées de durée T séparées par une période T. La dispersion provoque un allongement $\Delta\tau$ des impulsions. Le signal est correctement transmis si $\Delta\tau$ est inférieur à T. Le nombre maximum d'impulsions pouvant être transmis par seconde (ou capacité de transmission) est tel que

$$(4.4-15) \quad \boxed{CT = \frac{1}{T} = \frac{1}{\Delta\tau}}$$

Compte tenu de la relation ci-dessus entre $\Delta\tau$ et BP, on peut écrire la relation suivante :

$$(4.4-16) \quad \boxed{CT = 2 BP}$$

La longueur maximale L_{max} (en km) d'une liaison de capacité CT, réalisée à l'aide d'une fibre de bande passante BP, est égale à

$$(4.4-17) \quad L_{max} = \frac{2 BP \text{ (de la fibre en MHz.km)}}{CT \text{ (de la liaison en Mbits.sec}^{-1}\text{)}}$$

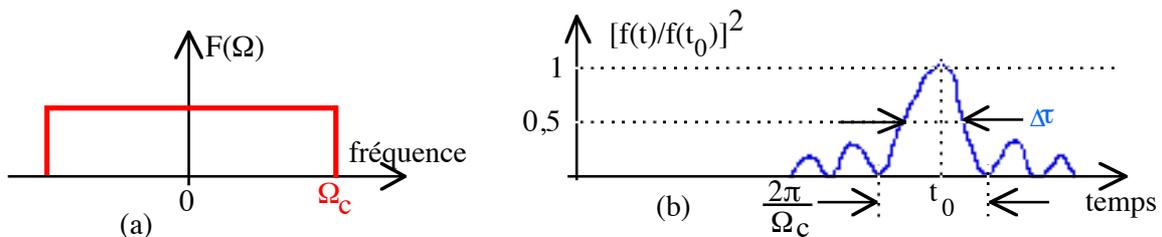


Fig. 4.4-8 : Une fibre optique est équivalente à un filtre passe-bas.

Sa fonction de transfert peut donc être représentée par la figure (a), où Ω_c est la fréquence de coupure. La réponse impulsionnelle d'une fibre est obtenue en prenant la transformée de

Fourier de la fonction représentée en (a). On obtient la courbe (b). $\Delta\tau$, la largeur à mi-hauteur du pic principal correspond à l'allongement d'une impulsion dans la fibre. Les pics secondaires sont dus à la forme simplifiée de la fonction de transfert mais n'ont pas de signification physique.

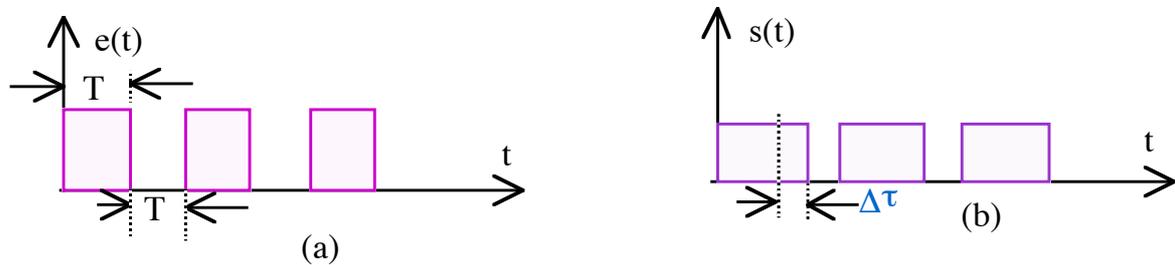


Fig. 4.4-9 : **Allongement des impulsions dans une fibre. (a) signal émis. (b) Signal détecté. Pour un signal symétrique, la limite de capacité de transmission de la fibre est atteinte quand l'allongement $\Delta\tau$ est égal à la durée des impulsions introduites dans la fibre.**

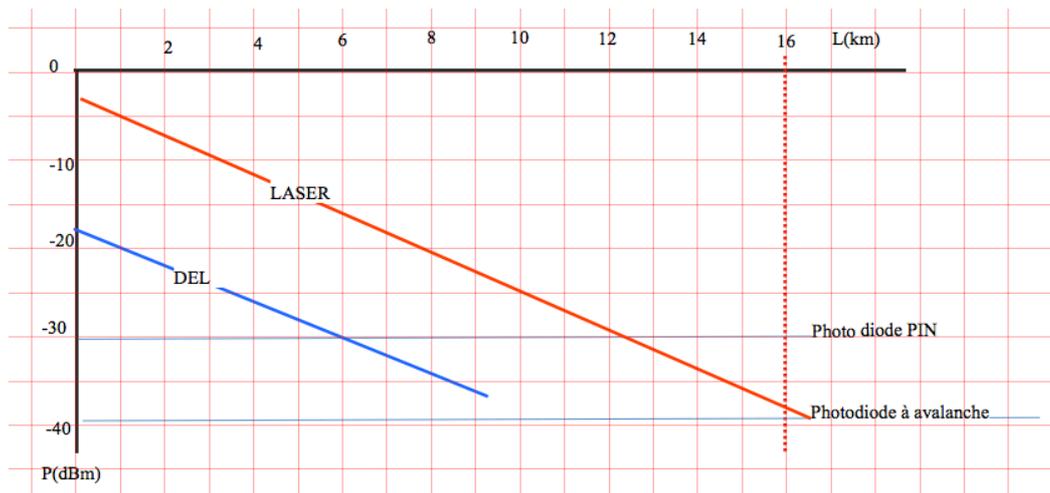


Fig. 4.4-10 : **Exemple de bilan de pertes d'une liaison optique.**

Sur cet exemple, on a considéré une fibre de coefficient d'atténuation 2 dB/km; la puissance injectée dans la fibre est, pour la diode laser, -7dBm, pour la DEL -20 dBm. La limite de détection est prise à -30 dBm pour la photodiode PIN et -40 dBm pour la photodiode à avalanche. On voit que la longueur maximale de la liaison est de 6 km si on choisit une DEL et une photodiode PIN et d'environ 18 km, si on choisit une diode laser et une photodiode à avalanche.

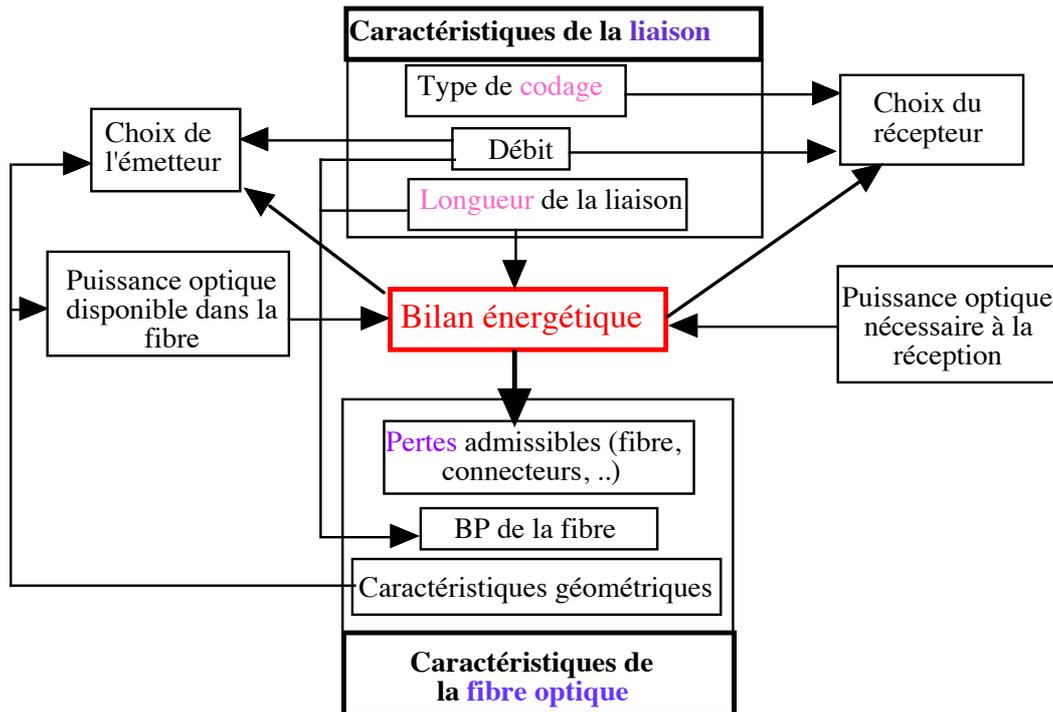


Fig. 4.4-11 : Synoptique du processus de décision du choix des composants lors de la conception d'une liaison à fibres optique point à point.

4.4.2.3.3 - Avantages de la liaison optique

La transmission d'informations par liaison optique présente, par rapport aux liaisons électriques, les avantages suivants :

- grande capacité de transmission;
- faibles pertes (par rapport aux câbles coaxiaux, l'atténuation des fibres optiques est inférieure de 2 ordres de grandeur tandis que la bande passante peut être supérieure de 4 ordres de grandeur) ;
- atténuation est constante pour tout le spectre de fréquences de modulation;
- immunité au bruit ém;
- immunité aux boucles de masse;
- absence de courts-circuits;
- grande résistance à la corrosion, aux radiations et aux hautes températures. De plus, les systèmes optiques sont légers et peu encombrants par rapport aux systèmes électriques de même capacité tout en présentant une bonne résistance une bonne flexibilité.

4.4.2.3.4 - Différents types de liaison optique

Il existe plusieurs solutions technologiques pour la réalisation d'une liaison optique. La première génération de liaison optique comprenait un encodeur, un émetteur, une fibre multimode en silice, des répéteurs, un récepteur et un décodeur. Le codage était obtenu par variation de l'intensité lumineuse (train d'impulsions). Les capacités de la liaison étaient limitées par la diffusion, l'atténuation et la dispersion de la fibre. L'augmentation de la transmission était liée au choix de la longueur d'onde (diodes à $1,55 \mu\text{m}$ où la silice est plus transparente) En 1978 la capacité de transmission était de $10^9 \text{ bits.km.s}^{-1}$. A la fin des années 80, l'amplificateur à fibre a permis de

multiplier par 100 cette capacité de transmission des signaux [Desur92] . Il s'agit de fibres dopées à l'erbium pompées par des diodes émettant à 0,98 ou 1,48 μm , ou de fibres dopées au praséodyme pompées par des diodes émettant à 1020 nm, l'information étant portée par un signal à 1,55 μm .

Les amplificateurs optiques à fibres dopées à l'erbium offrent un gain supérieur à 30 dB sur une largeur de bande spectrale voisine de 30 nm; la réponse est rapide, atteignant 100 Gbit/s [Augé.92].

Parmi les expériences réalisées on peut citer le cas d'une transmission de 5 Gbits s^{-1} sans déformation sur une distance de 9000 km. Un câble transocéanique qui pourra véhiculer 600 000 conversations téléphoniques simultanées doit être installé en 1995. Les liaisons à amplification optique ont pour principal avantage de fonctionner sans répéteurs.

Les liaisons à amplification optique sont particulièrement performantes lorsque l'information est véhiculée par solitons (impulsions brèves se propageant sans se déformer). Une parfaite maîtrise des liaisons à solitons permettra d'éliminer les répéteurs, même sur des liaisons transocéaniques. En 1990 on atteignait une portée de 115 km à 20 Gbit/s sans régénérateur [Ohns.92].

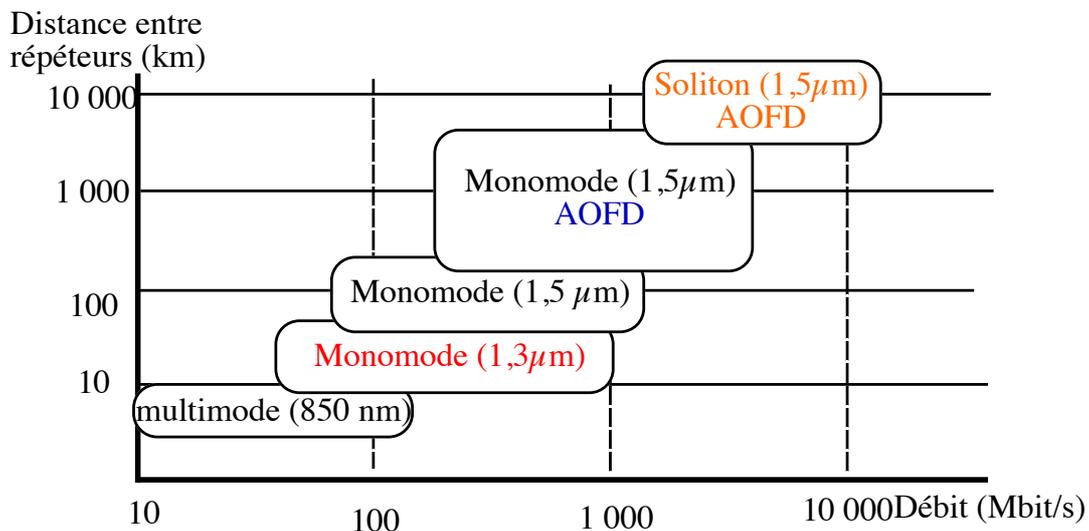


Fig. 4.4-12 : - Capacité de transmission des différents type de fibres optiques [Carb92] AOFD = Amplification optique dans fibres dopées

- Liaison **Singapour-Marseille** / Société Alcatel / Liaison de **560 Mbits/s** (équivalent à **16 000** liaisons téléphoniques simultanées / Année de réalisation : **1991** .

- Liaison transatlantique **TAT 12** (British Télécom-France Télécom- ATT) / Longueur **6000 km** / Technologie : Amplification optique dans fibres dopées à l'Erbium / Capacité : **600 000 liaisons** téléphoniques simultanées / Année de réalisation : **1995** .

Exemples de réalisation de liaison optique

4.4.3 STOCKAGE ET LECTURE D'INFORMATIONS

4.4.3.1 - STOCKAGE D'INFORMATIONS.

La lumière se prête bien au transport d'informations mais il n'est pas possible de garder l'information en mémoire sous forme de lumière. Le laser constitue cependant un outil remarquable pour l'inscription ou la restitution d'informations sur un support matériel. Parmi les matériaux utilisés on peut citer :

- les matériaux non réversibles:
 - émulsions photographiques (énergie nécessaire: 10^{-10} à 10^{-4} J/cm²)
 - résines photo polymérisables (0,1 à 1 J/cm²).
- les matériaux réversibles:
 - thermomagnétiques (MnBi)
 - électro-optiques (LiNbO₃)
 - thermoplastiques
 - magnétiques.

L'écriture de la mémoire par voie optique permet d'obtenir une densité de 10^6 à 10^7 bits/cm² (10^6 bits/cm² pour les matériaux magnétiques). Un vidéodisque de 30 cm de diamètre supporte environ 10^{10} bits. Les trous ont une largeur de 0,5 à 0,8 μm et sont séparés par un pas de 1,5 à 2,5 μm.

Les lasers utilisés sont le laser à argon, le laser à He-Cd ou le laser à AsGa.

Le disque optique (ou disque compact) est devenu le support le plus répandu. Il existe :

- des disques optiques "audio" ; la source est une diode émettant à 780 nm;
- des disques optiques "vidéo" de haute densité ; la source est une diode du type AlGaInP (670 nm, 5 mW, faible bruit)
- des disques compacts interactifs (CD-I) ; grâce à des techniques de compression des informations, un disque de 12 cm de diamètre permet jusqu'à 8 h d'enregistrement de son ou 6 à 7000 images, soit environ 600 MO.

Technique d'enregistrement sur CD-I :

Le support d'écriture est une couche mince d'un matériau magnétique. L'inscription des informations se fait par *effet magnéto-optique* ; le faisceau laser est utilisé pour chauffer un point pour inverser en ce point l'orientation de la magnétisation. La lecture se fait par changement de polarisation d'un faisceau de faible puissance réfléchi par la surface du matériau.

L'information peut aussi être mémorisée par changement de phase dans le faisceau d'écriture. On exploite alors la différence de pouvoir réfléchissant entre l'état cristallin et l'état amorphe d'un même matériau. Le changement est obtenu en chauffant le matériau jusqu'à la température (voisine du point de fusion) pour laquelle on observe le passage de l'état cristallin à l'état amorphe ou inversement. Les avantages par rapport à l'enregistrement magnéto-optique sont un meilleur rapport signal à bruit et un système optique plus simple.

D'autres matériaux (en particulier les matériaux organiques) sont en cours d'investigation.

4.4.3.2 - LE LECTEUR DE DISQUE COMPACT.

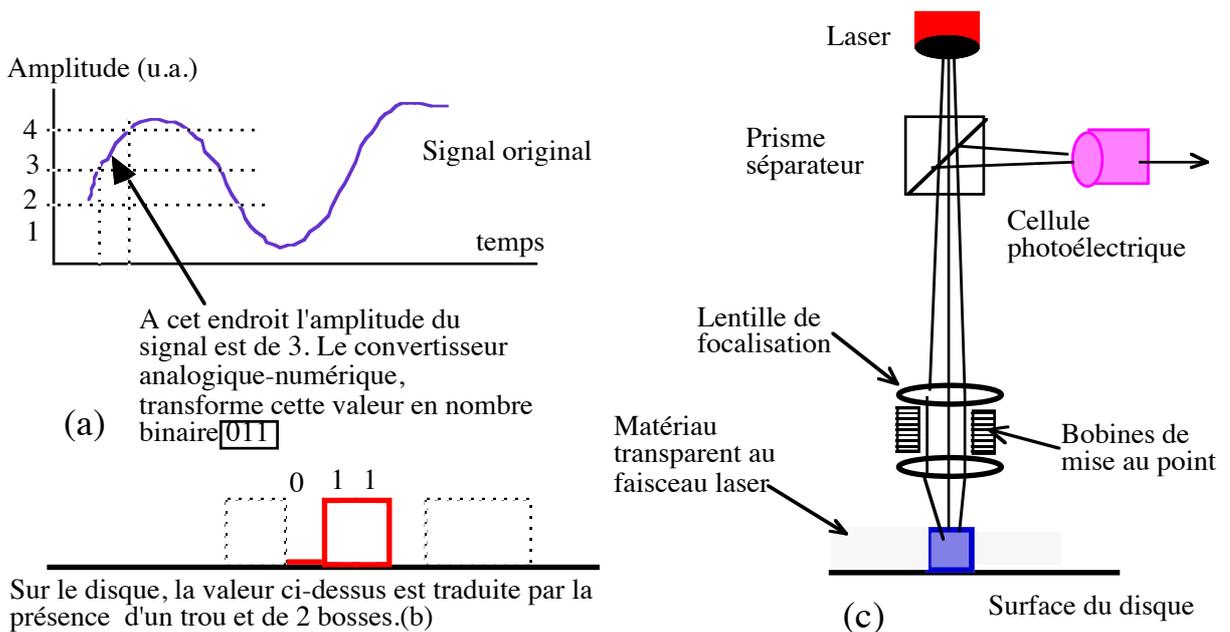


Fig. 4.4-13 : Principe de l'enregistrement et de la restitution d'information sur un disque à lecture optique [Phil.82].

Le signal analogique est numérisé (a). La succession de 0 et de 1 est traduite au moment de l'enregistrement sur le disque par une succession de creux et de bosses (b). Un faisceau laser est focalisé sur la surface du disque (c). Au passage sur un creux, le signal reçu par le photodétecteur est minimum ; une bosse donne un maximum de signal. Il est ainsi possible de reconstituer électroniquement le signal de départ.

Le principe de l'enregistrement d'un son sur un disque compact en vue d'une lecture optique de l'information est présenté sur la figure 13. On échantillonne le signal de chacune des deux voies à la fréquence de 44,1 kHz. Cette fréquence est supérieure au double de la fréquence maximale audible. Dans ces conditions, d'après le théorème de Shannon, il n'y a pas de perte d'information. Chaque échantillon sonore est quantifié sur 16 bits auxquels on ajoute des bits de correction d'erreurs, de synchronisation et de contrôle. Au total, environ 18×10^9 bits d'information sont enregistrés sur un disque compact audio. L'information est codée sous la forme d'une succession de microcuvettes rectangulaires de largeur $0,5 \mu\text{m}$, de longueur variant de $0,8$ à $3 \mu\text{m}$ et disposées en spirales espacées de $1,6 \mu\text{m}$. Les microcuvettes ont une surface aluminisée réfléchissante et sont recouvertes d'un vernis transparent. La tête de lecture utilise la lumière d'une diode laser AsGaAl émettant à $0,78 \mu\text{m}$, concentrée en une tache de $1 \mu\text{m}$ de diamètre et de $2 \mu\text{m}$ de profondeur de focalisation. Les microcuvettes défilent à une vitesse de $1,2$ à $1,3 \text{ m/s}$ sous le faisceau laser; le débit d'informations ainsi lues est de $1,4112 \times 10^6$ bits par seconde. Lorsque le faisceau rencontre le sommet d'une cuvette, l'intensité renvoyée dans l'axe du faisceau est maximale, ce qui correspond à un "1". Le passage sur un creux donne un minimum d'intensité, ce qui se traduit par un "0". Un codage particulier permet d'espacer deux '1' par deux '0'. Par conversion numérique-analogique, le signal original est reconstitué.

4.4.3.3 - L'IMPRIMANTE À LASER.

La précision avec laquelle un faisceau laser peut balayer une surface, a été également mise à profit dans les imprimantes. On utilise un laser à HeNe à argon ou à HeCd dont le faisceau balaye un tambour photoconducteur à sélénium grâce à un modulateur acousto-optique. La figure ci-après montre le dispositif optique utilisé pour adresser la surface d'écriture [Sprag.83]. Le balayage des

lignes est obtenu à l'aide de la rotation du miroir polygonal, tandis que le modulateur dévie le faisceau suivant la direction orthogonale. Le mouvement de rotation du tambour permet de passer d'une ligne à l'autre.

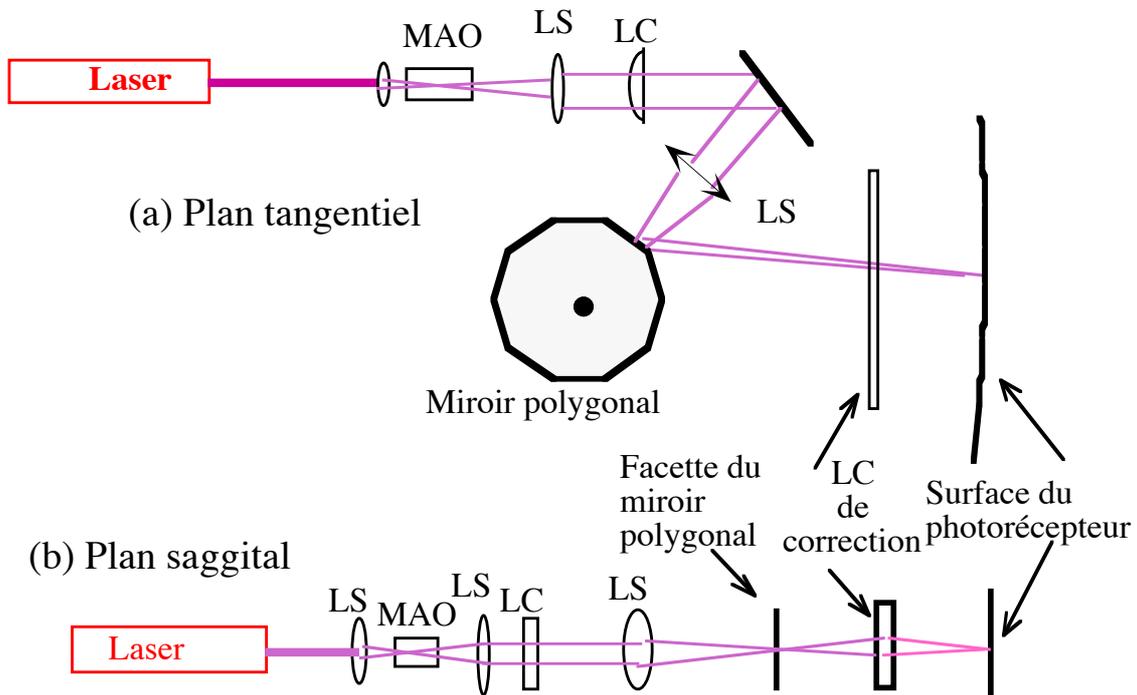


Fig. 4.4-14 : - Dispositif optique d'adressage dans une imprimante à laser.

MAO : modulateur acousto-optique ; LS : lentille sphérique ; LC : lentille cylindrique.

4.4.4 BIBLIOGRAPHIE.

- [P.Lecroy] – Communications sur fibres optiques. 4^{ème} ed., Pierre Lecroy, Lavoisier-Hermès, ISBN : 978-2-7462-4660-7, 2015
- [Augé.92] "Les progrès de l'amplification optique", J. Augé, J. Chesnoy, P.-M. Gabla, A. Weygang, Revue des Revue des télécommunications, (4^{ème} trim. 1992)
- [Carb92] "L'impact des communications optiques", J.-C. Carballes, Revue des télécommunications, (4^{ème} trim. 1992)
- [Coz.81] - A. Cozannet, J. Fleuret, H. Maître, M. Rousseau; "Optique et Télécommunications", Eyrolles, Paris, 1981.
- [Desur92] "Les amplificateurs à fibres optiques", Desurvire E.; Pour la Science, N°173, pp 60-67, (mars 1992)
- [Gasq.90] Gasquet C., Witomski P.; "Analyse de Fourier et Applications", Masson, 1990.
- [Kao.66] "Dielectric fibre surface waveguide for optical frequencies", Proc. IEEE, Vol. 133, N°7, pp 1151-1158, (Juill. 1966)
- [Ohns.92] "Les systèmes et les composants optoélectroniques de demain", H. Ohnsorge, H. Haupt, P. Desombre, Revue des télécommunications, (4^{ème} trim. 1992)
- [Phil.82] Le compact-disc digital audio ; Documentation technique Philips, 1982
- [Pourp.90] - B. Pourprix; "Introduction à la transmission par fibres optiques", Bull. de l'Union des Physiciens, N°685, p 1035-1053, 1990
- [RTC.83] "Photocoupleurs", Brochure technique du constructeur RTC, (4^{ème} trim. 1983)

[Sprag.83] "Advances in laser and E-O printing technology"; R. A. Sprague, J. C. Urbach, T. S. Fisli, Laser Focus/Electro-Optics, p101, (Oct. 1983).