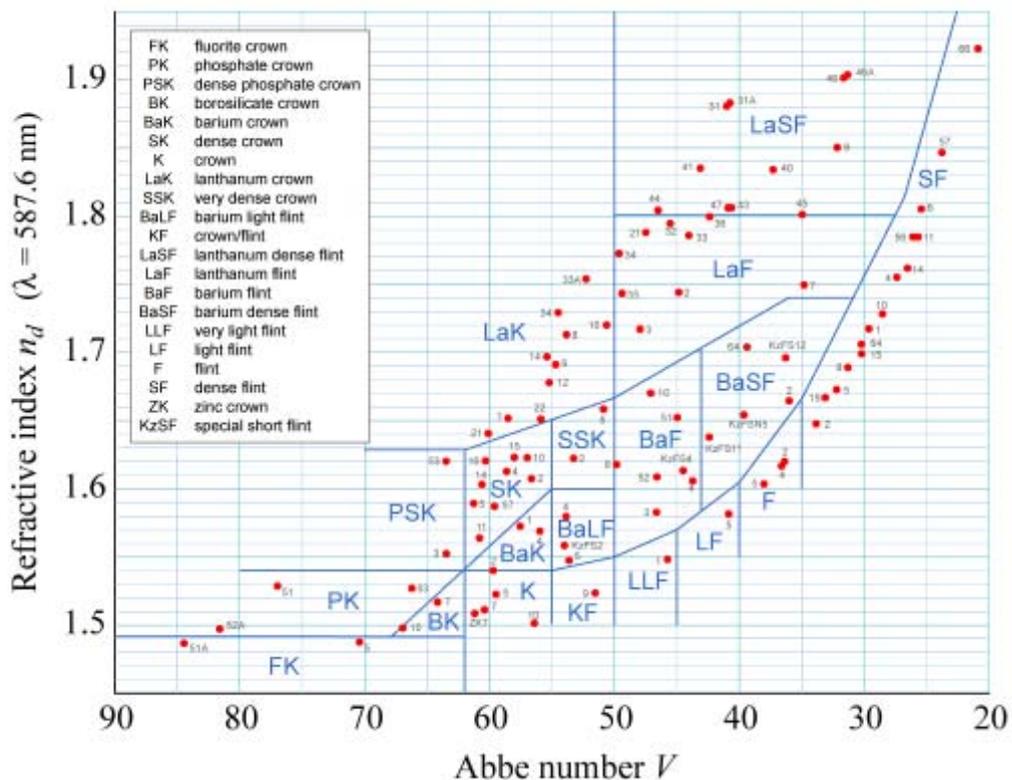


Département des Technologies Industrielles (TIN)
Module: Automatisation industrielle et optique (AIO)

Cours d'Optique - Orientation MI

TECHNOLOGIES OPTIQUES (1)



Prof. Lorenzo Zago,

Wikipédia et nombreux autres contributeurs

T A B L E D E S M A T I E R E S

	<u>PAGE</u>
1. LES MATERIAUX OPTIQUES	1-1
1.1 LE VERRE	1-1
1.1.1 Nature	1-1
1.1.2 Composition	1-1
1.1.3 Types de verres produits industriellement	1-3
1.1.4 Catalogue des verres optiques	1-3
1.2 PROPRIETES OPTIQUES DU VERRE	1-6
1.2.1 Indice de réfraction	1-6
1.2.2 La dispersion	1-6
1.2.3 Formules analytiques	1-7
1.2.4 Atténuation d'un verre	1-8
1.3 PROPRIÉTÉS PHYSIQUES	1-9
1.3.1 Propriétés mécaniques	1-9
1.3.2 Propriétés thermiques des verres optiques	1-9
1.3.3 Propriétés liées à la qualité	1-10
1.4 FABRICATION DES ELEMENTS EN VERRE OPTIQUE	1-12
1.5 LES CRISTAUX	1-13
1.5.1 Autre propriétés de cristaux particuliers	1-15
1.6 LES VITROCERAMIQUES	1-16
1.6.1 Fabrication et utilisation des céramiques	1-16
1.7 AUTRES MATÉRIAUX POUR GRANDES OPTIQUES	1-17
1.8 LES POLYMERES OPTIQUES	1-18
1.8.1 Caractéristiques des polymères par rapport aux verres	1-18
1.8.2 Avantages par rapport aux verres	1-18
1.8.3 Caractéristiques de quelques polymères optiques	1-19
1.8.4 Fabrication des pièces optiques en polymères	1-20
1.9 COLLES ET LIQUIDES	1-21
1.10 BIBLIOGRAPHIE	1-22
2. FIBRES OPTIQUES	2-1
2.1 LE TRAJET LUMINEUX DANS UNE FIBRE	2-2
2.1.1 L'ouverture numérique	2-2
2.1.2 Fibre multimode à saut d'indice	2-3

2.1.3	Fibre multimode à gradient d'indice	2-3
2.1.4	Fibre monomode	2-4
2.2	MODES DE PROPAGATION	2-5
2.3	DISPERSION MODALE.....	2-6
2.4	BANDE PASSANTE	2-7
2.5	AUTRES PHÉNOMÈNES DE DISPERSION.....	2-7
2.5.1	Dispersion chromatique	2-7
2.5.2	Réseaux de Bragg.....	2-9
2.5.3	La dispersion de polarisation.....	2-10
2.6	ATTÉNUATION.....	2-12
2.7	TECHNOLOGIES ENVIRONNANTES	2-15
2.7.1	Le multiplexage WDM et DWDM.....	2-15
2.7.2	Les connexions	2-16
2.7.3	Les réseaux optiques	2-17
2.7.4	Le codage du signal	2-18
2.8	EXERCICES.....	2-19
3.	ANNEXES.....	3-1
3.1	LA BIRÉFRINGENCE ÉLECTRIQUE.....	3-1
3.2	EFFET RAMAN	3-2

1. LES MATERIAUX OPTIQUES

Les principales pièces optiques telles que les lentilles, les prismes et les miroirs etc. sont faites habituellement en verre optique, souvent en matériau synthétique, plus rarement en cristal ou en verre céramique.

1.1 LE VERRE

1.1.1 Nature

Le verre est un matériau solide amorphe formé par solidification progressive d'un liquide visqueux, obtenu par fusion de minéraux cristallins.

La transition de l'état solide <--> liquide en un cristallin solide advient instantanément à une température précise (T_f température de fusion). Dans le verre, elle advient de façon graduelle et continue par variation progressive de la viscosité dans un intervalle de température où l'on repère la T_g , température de transition vitreuse.

C'est pour cette raison que l'histoire technique (durée et intensité de la fusion, durée et courbe thermique du refroidissement) a une grande influence sur les qualités physiques et chimiques du verre résultant. En fonction de sa composition et de son histoire technique, le verre peut être transparent, translucide ou opaque, incolore ou coloré.

A température ambiante il est très dur (dureté de 5-6 sur l'échelle de Mohs) et fragile, il n'est pas poreux, il a une brillance élevée, réfléchit les rayons lumineux, se dilate de façon minimale à la chaleur dont il est un mauvais conducteur; il ne se dissout ni dans l'eau ni dans les acides, y compris l'acide concentré, (excepté l'acide fluorhydrique) même s'il y perd, en quantité minimale, et surtout à chaud, les ions modificateurs de sa surface. Il se dissout par contre dans les solutions basiques. Il ne brûle pas et ne se laisse pas calciner; sous l'action d'une chaleur élevée il se transforme en passant par différents états de la viscosité: à l'incandescence blanche il est fluide, à l'incandescence rouge il est pâteux. C'est dans ce dernier état de viscosité que le verre peut être modelé

1.1.2 Composition

Le verre est composé d'un mélange homogène d'oxydes en proportions variables, que l'on distingue en oxydes formateurs et oxydes modificateurs du squelette de verre. Les principaux oxydes formateurs du squelette de verre (et pour cela également appelés vitrifiants) sont la silice (SiO_2) et l'anhydride borique (B_2O_3), même si de nombreux autres oxydes trivalents ou tétravalents (de phosphore, germanium, etc.) possèdent les mêmes caractéristiques.

Parmi les oxydes modificateurs, on distingue les fondants (oxydes alcalins, principalement ceux de sodium et de potassium) et les stabilisants (oxydes alcalino-terreux de calcium, magnésium, baryum.).

Les oxydes de certains éléments comme le plomb peuvent être à la fois formateurs et modificateurs du squelette vitreux. Les verres de silicate, les plus nombreux, sont constitués par un squelette dans lequel les atomes de silice et d'oxygène sont liés entre eux par de forts liens chimiques covalents. D'autres éléments interrompent la continuité du squelette (c'est pour cela qu'ils sont appelés oxydes modificateurs) et créent un lien de type ionique. Le **verre** au sens où nous l'entendons en optique appliquée est un solide transparent, amorphe, homogène et fragile. Le verre se comporte comme un

liquide dont la viscosité serait pratiquement infinie¹. En l'absence de contraintes externes, il est isotropique. Le verre résulte de la fusion de plusieurs substances, dont voici les plus importantes:

- **Les vitrifiants:** la silice (SiO_2) sous forme de sable de quartz est le constituant principal du verre.
- **Les fondants (ou flux)** ont pour rôle d'abaisser la température de fusion de la silice et d'empêcher la restructuration cristalline lors du refroidissement. Les fondants sont sous forme d'oxydes ou de carbonates alcalins (le carbonate de sodium Na_2CO_3 , la potasse, la magnésie MgO ou $\text{Mg}(\text{OH})_2$).
- **Les modifiants** ont pour rôle de modifier les propriétés optiques (indice de réfraction, dispersion), mécaniques et chimiques (stabilisants) du verre. Anciennement on utilisait l'oxyde de plomb PbO pour augmenter l'indice de réfraction. On utilise maintenant du Titane, du Lanthane, du Thorium et des terres rares pour ajuster l'indice et le nombre d'Abbe. L'alumine (Al_2O_3) diminue le coefficient de dilatation et diminue la tendance à la dévitrification. Il y a **dévitrification** du verre quand celui-ci perd sa structure amorphe et a tendance à se cristalliser.
- **Les colorants:** ce sont des oxydes métalliques qui permettent d'obtenir des verres colorés dans la masse pour des filtres. On les utilise également pour supprimer une coloration gênante du verre.

La composition chimique d'un verre peut varier pratiquement à l'infini, ce qui explique le très grand nombre de verres sur le marché.

¹ On observe dans les vieux vitrages de château que le bas des carreaux est plus épais que le haut.

1.1.3 Types de verres produits industriellement

La production industrielle de verre se répartit selon les quatre types de verres suivants:

- **Verre-glace** (*float glass*). Il s'agit du verre à vitres et du verre à miroirs obtenus par flottaison du verre fondu sur un bain d'étain.
- **Verre technique**. Sous ce nom on trouve les verres résistant à la chaleur et aux chocs, le verre trempé, le verre pour ampoules ou pour vaisselle de laboratoire, le verre à bouteilles ainsi que les verres pour écran d'ordinateur.
- **Verre de lunetterie**. C'est le verre à lunettes et le verre d'optique ordinaire. Il se présente sous forme de feuilles obtenues par étirage au dessus d'un bain de verre en fusion. L'épaisseur maximale obtenue par ce procédé est de 10 mm. Il est utilisé la fabrication de lentilles de faible épaisseur, ou pour des réticules gravés chimiquement à l'acide fluorhydrique ou encore pour en faire des calibres de courbure (bas prix de revient et dureté favorable).
- **Verre d'optique**. Ce verre, aussi connu sous le nom de **verre scientifique**, est celui qui nous intéresse en priorité ici.

Le verre glace et le verre à bouteilles constituent environ les 90% de la production mondiale de verre.

1.1.4 Catalogue des verres optiques

Chaque fabricant donne un nom à chaque verre. Ce nom rappelle souvent sa composition chimique mais n'est pas normalisé. En pratique, les noms des matériaux produits par la société Schott Glass font référence dans la conversation, au moins en Europe et aux USA. De plus, il existe une dénomination des verres, dérivée d'une norme « Mil »: Elle comprend 6 chiffres dont les trois premiers sont les décimales de l'indice et les 3 derniers sont le nombre d'Abbe multiplié par 10. Exemple: $n=1.517$, $V=64.5$ sera noté 517/645.

En cas de développement d'un appareil destiné à être fabriquer en série, on peut être amené à spécifier des composants optiques sur mesure et par conséquent d'en choisir le verre. Or, il existe des dizaines de verres optiques différents, mais pour des raisons d'approvisionnement et de coût, le consommateur à tout intérêt à s'imposer de travailler avec la liste préférentielle des fabricants. En effet, certains types de verre ne sont tout simplement pas livrables de stock et le fabricant va attendre d'en avoir suffisamment en commande pour faire une cuisson, sans s'engager sur la date. Un contact avec le fabricant vous donnera immédiatement produits livrables et leur prix.

Pour différencier les verres optiques, on utilise un diagramme classant les verres optiques en fonction de l'indice n_D et du nombre d'Abbe V_D (réf. $\lambda = 587,6$ nm).

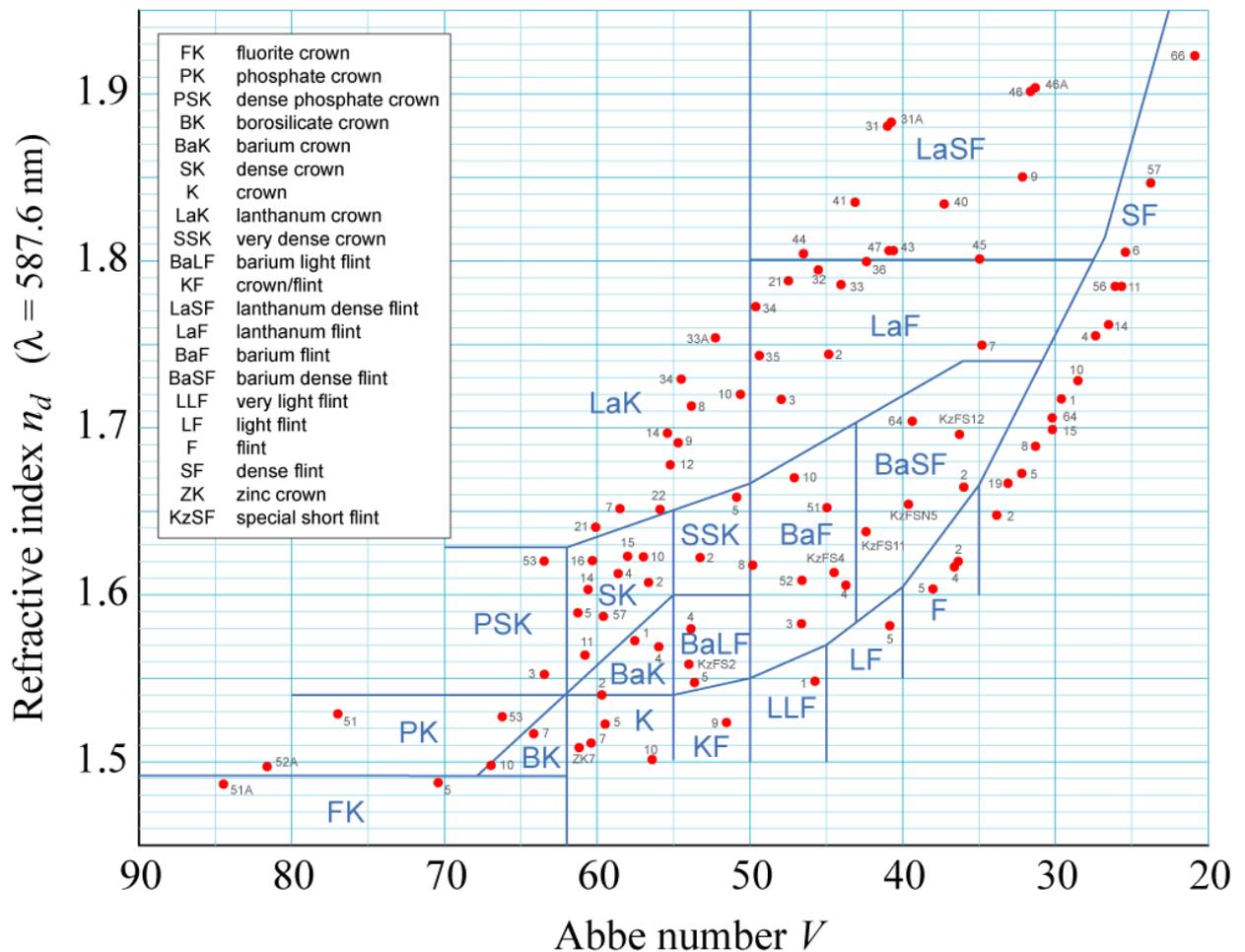


Figure 1-1 Diagramme de Abbe pour les principaux verres optiques

On voit que les verres sont séparés en 2 familles: les « **crown** » qui ont $V \geq 55$ si $N < 1.6$ et $V \geq 50$ si $n > 1.6$. De l'autre côté de cette limite se trouvent les « **flints** ».

Le verre **crown** contient des oxydes de sodium et de calcium et disperse peu (son nombre d'Abbe est supérieur à 45). Des types de verre crown encore moins dispersifs sont disponibles où sont ajoutés des oxydes de baryum ou de lanthane.

Le verre **flint** avec une proportion importante d'oxyde de plomb ainsi que du silicate de potassium. Fort pouvoir dispersif (son nombre d'Abbe est inférieur à 39).

Pour corriger l'aberration chromatique des optiques, on combine des lentilles en verre flint et crown. Les verres sont également classés selon leur composition chimique.

Sans entrer dans les détails, on peut situer les grandes familles suivantes. Il est aussi intéressant de noter la nette tendance à l'augmentation de la **masse volumique** des verres lorsque l'indice augmente.

Nom de famille	Abréviations			Limites		Masse volumique g/cm ³
	USA	Allemande	Française	indice n _d	Nb d'Abbe V _d	
Fluor crown	FC	FK	FC	==> 1.49	62 ==>	2.31
Borosilicate crown	BSC	BK	BSC	1.49	62 - 68	2.44
Crown	C	K	C	==> 1.54	55 - 62	2.53
Flint extra léger	ELF	LLF	FEL	==> 1.55	45 - 50	2.90
Flint léger	LF	LF	FL	==> 1.57	40 - 55	3.21
Flint lourd (dense)	DF	F	FD	==> 1.60	35 - 40	3.67
Baryum crown léger	LBC	BaK	BCL	1.54	55 - 62	3.20
Baryum crown lourd	DBC	SK	BCD	1.54 - 1.62	62	3.58
Flint baryum léger	LBF	BaLF	FBL	1.54 - 1.60	55	3.09
Flint baryum	BF	BaF	FB	1.55 - 1.70	45 - 50	3.31
Flint baryum dense	DBF	BaSF	FBD	1.58 - 1.70	35 - 42	4.01
Lanthane crown	LaC	LaK	---	1.62 ==>	62 ==>	4.03
Lanthane flint	LaF	LaF	---	1.67 ==>	50	4.20

Les verres au Lanthane sont une famille totalement différente des verres habituels en ce qu'ils sont faits à base de Lanthane à la place de silice.

Le catalogue des verres de plusieurs fournisseurs se trouvent typiquement intégré dans tout logiciel de calcul optique.

1.2 PROPRIETES OPTIQUES DU VERRE

1.2.1 Indice de réfraction

L'**indice de réfraction** est la caractéristique la plus importante d'un matériau optique utilisé dans la fabrication d'éléments travaillant en transmission

L'indice de réfraction est le rapport de la vitesse de la lumière dans le vide sur la vitesse de la lumière dans le matériau considéré. L'indice de l'air dans les conditions normales de pression et de température est de 1.0003 alors que, par convention, l'indice du vide est exactement égal à 1. On parle d'**indice absolu**.

Les ingénieurs opticiens utilisent rarement les indices absolus, mais plutôt l'**indice relatif** (à l'air): l'indice d'un matériau par rapport à l'air ambiant qui entoure, en général, les systèmes optiques. C'est le cas notamment du catalogue Schott « optical Glass » et des logiciels d'aide à la conception de systèmes optiques tels Zemax et WinLens.

S'il est vrai que pour une étude préliminaire d'un projet, la différence entre l'indice absolu et l'indice relatif peut être négligée, en revanche une étude détaillée doit en tenir compte.

1.2.2 La dispersion

Il est connu que l'indice d'un verre n'est pas constant par rapport à la longueur d'onde λ de la lumière qui le traverse. Le phénomène se manifeste par une variation de l'angle de réfraction sur un dioptre d'un rayon en fonction de la longueur d'onde de la lumière incidente.

La loi $n = n(\lambda)$ représente mathématiquement le phénomène de la **dispersion** de la lumière à cause de la variation de l'indice de réfraction.

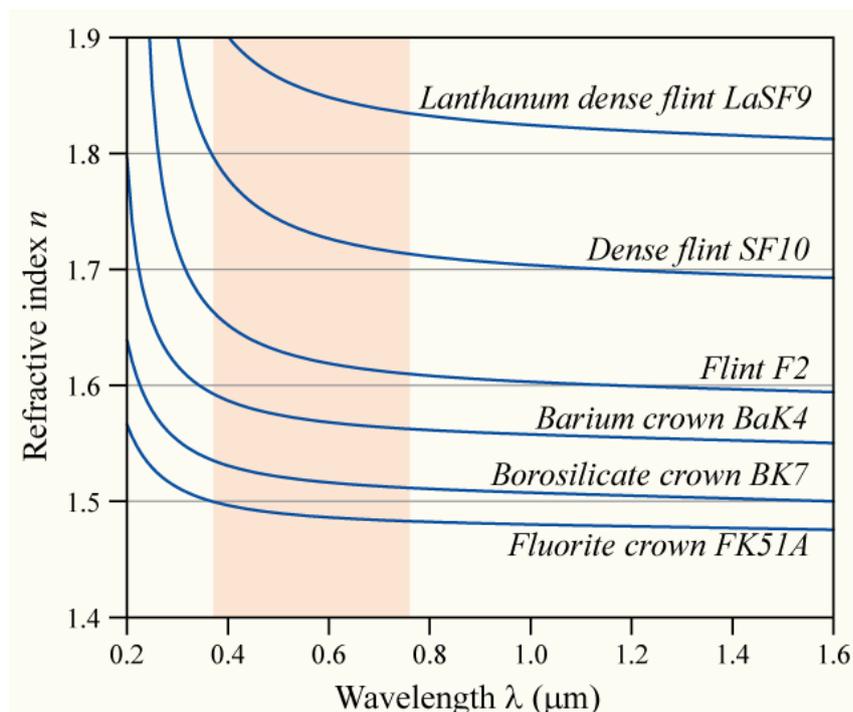


Figure 1-2 Indice de réfraction en fonction de la longueur d'onde pour les principaux verres optiques.

Tous les matériaux utilisés en optique ont un indice de réfraction plus élevé pour les courtes longueurs d'onde (vers le bleu, environ 450 nm) que pour les grandes longueurs d'ondes (vers le rouge, environ 700 nm).

La dispersion du verre pour une longueur d'onde λ , se calcule en déterminant le taux de variation de l'indice par rapport à la longueur d'onde, ce qui correspond donc à la dérivée de n par rapport à λ .

$$\text{dispersion}(\lambda) = \frac{\partial n}{\partial \lambda}$$

Cette dispersion étant une dérivée, elle va aussi varier avec λ . Pour les pré-calculs des combinaisons optiques, on utilise une autre grandeur pour caractériser la dispersion: le **nombre d'Abbe**².

Dans le visible, ce nombre est défini de la manière suivante:

$$V_d = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C}$$

Où les indices sont déterminés pour les **raies spectrales F, D et C**.

Elément chimique	Nom de la raie spectrale	Longueur d'onde en nm
Hydrogène	F	486.13
Hélium	D	587.56
Hydrogène	C	656.27

Table 1-1: Raies spectrales utilisées pour la dispersion (dans le visible)

Par exemple, le nombre d'Abbe du BK7 (un des verres optiques les plus utilisés) est $V_d=64.1$.

On note que si le verre est très dispersif ($n_F - n_C$ grand) le nombre d'Abbe devient petit.

Si l'on travaille hors du domaine visible, on peut définir un nombre d'Abbe à partir de raies correspondant au domaine spectral d'intérêt.

1.2.3 Formules analytiques

Pour les verres, il existe aussi plusieurs formules empiriques permettant de calculer l'indice de réfraction en fonction de la longueur d'onde. Par exemple:

Formule de Cauchy $n = \alpha + \frac{\beta}{\lambda^2}$

Formule de Schott (1950) $n^2 = a_0 + a_1\lambda^2 + a_2\lambda^{-2} + a_3\lambda^{-4} + a_4\lambda^{-6} + a_5\lambda^{-8}$

Formule de Sellmeier $n^2 - 1 = \frac{B_1\lambda^2}{\lambda^2 - C_1} + \frac{B_2\lambda^2}{\lambda^2 - C_2} + \frac{B_3\lambda^2}{\lambda^2 - C_3}$

Les fabricants de verres optiques donnent en général les valeurs des coefficients, ainsi que le domaine de validité des formules, et d'autres caractéristiques, telles que facteurs de transmission.

² Les logiciels ne calculent pas avec le nombre d'Abbe, mais l'affichent pour mémoire

1.2.4 Atténuation d'un verre

Il est souvent nécessaire de tenir compte de l'atténuation du flux lumineux dans le verre. En effet, si un flux lumineux arrive sur un dioptre, sa valeur ϕ_0 juste après avoir traversé le dioptre va diminuer en fonction de son parcours à l'intérieur du verre.

A une distance x dans le verre, le flux correspondant ϕ est donné par la formule suivante:

$$\phi = \phi_0 e^{-kx} \quad \text{loi de l'atténuation dans un milieu absorbant}$$

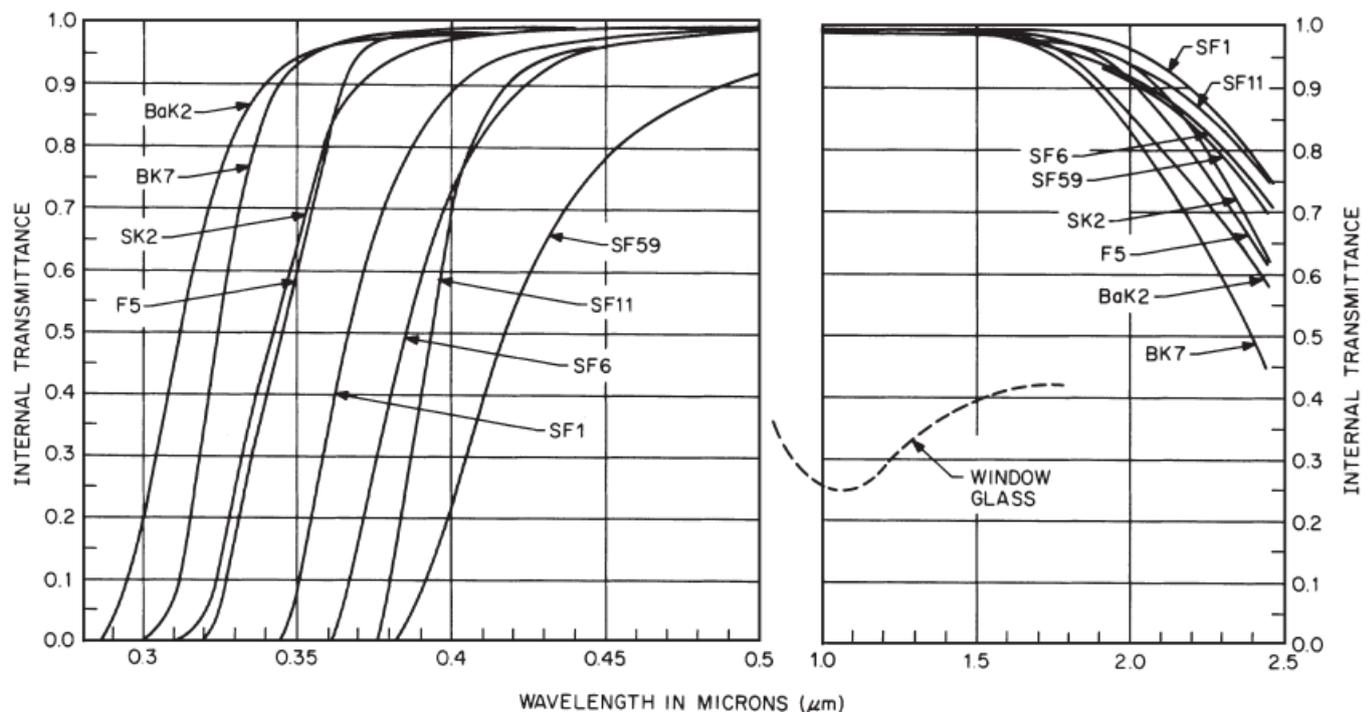
où k est le **coefficient d'absorption** du milieu absorbant. k dépend en général de la longueur d'onde et son unité est l'inverse d'une longueur.

$1/k$ est la longueur sur laquelle le flux s'affaiblit d'un facteur e . Quand on considère un élément optique de l'extérieur, on utilise aussi le **facteur de transmission** t (sans dimension):

$$t = e^{-kx}$$

Exemple: Le facteur de transmission du BK7 est de 0.97 à 350 nm alors qu'il vaut 0.998 à 700 nm pour une épaisseur de verre traversée par la lumière égale à 25 mm.

Les flints lourd et les verres Lanthane transmettent moins bien dans le bleu.



• Figure 1-3 Transmission pour une épaisseur de 25mm.

1.3 PROPRIÉTÉS PHYSIQUES

Les valeurs qui suivent ne sont destinées qu'à fournir un ordre de grandeur, car il existe plusieurs variétés de verres, des *flints* lourds (chargés en plomb; poids volumique variant de 2 500 à 5 900 kg/m³) au verre à vitre standard (2 500 kg/m³) en passant par les *crowns* (de 2 200 à 3 800 kg/m³), etc.

Propriété physique	Valeur	unité
Masse volumique	2 500	kg/m ³
Module d'Young	69 000	MPa
Coefficient de Poisson	0.25	S.I.
Limite d'élasticité	3 600	MPa
Résilience	de 1500 à 2500	Pa
Coefficient de dilatation linéaire	de 0,5 à 15×10 ⁻⁶	/°C
Conductibilité thermique	1	W/m/°C

1.3.1 Propriétés mécaniques

Pour les éléments optiques de grande taille comme les miroirs des grands télescope il devient nécessaire de faire une analyse structurelle afin de s'assurer que les déformations dues à la gravité sont sous contrôle.

En ce qui concerne la fabrication et l'entretien des composants, la **microdureté** a son importance. Elle est une mesure d'une empreinte dans la matière effectuée sous charge connue. Les matières tendres se raient ou se déforment facilement, elles ne peuvent pas être usinées ou le sont difficilement. Le chlorure d'argent, la fluorine et les flints denses sont des substances tendres. En Vickers, le verre SF58 a une dureté de 329, alors que le BaF50 a une dureté de 701.

1.3.2 Propriétés thermiques des verres optiques

Si un système optique optimisé doit fonctionner en dehors des conditions normales de température (20 degrés Celsius) et de pression de l'air ambiant (1013 mbar ou 1 atmosphère), il est nécessaire de tenir compte des nouvelles conditions. En effet, les dimensions des pièces (rayons de courbure et épaisseurs) sont modifiées sous l'effet de la température, ce qui peut entraîner des modifications dans la qualité de l'image.

Cependant, dans la grande majorité des situations, la déformation de la partie mécanique du système induite par le changement de température sera l'effet dominant. En cas d'excursion thermique les problèmes suivants vont apparaître par ordre d'importance:

1. Une déformation de la structure.
2. Des contraintes mécaniques dans les verres à cause de la dilatation différentielle avec les montures, voire des décollements de doublets.
3. Une modification de la taille des éléments optiques et des indices de réfraction.

L'ingénieur doit être très attentif à ces problèmes et doit tenir compte des propriétés thermiques des matériaux dès que le système optique est utilisé dans des conditions non standards. Les logiciels de calcul d'optique évolués tiennent compte des effets de température liés au point 3 mais pas aux 2 points précédents qui sont souvent plus importants.

Les dimensions des rayons de courbure des dioptrés et les épaisseurs des verres varient avec la température. Les lentilles changent donc de forme. Les variations sont déterminées à partir de la loi classique de **dilatation linéaire** d'un matériau:

$$\Delta l = \alpha \Delta T$$

Où Δl est la variation de longueur due à une élévation de température ΔT .

α est le **coefficient de dilatation linéaire** (*Coefficient of Thermal Expansion*, abrégé *CTE*).

Le coefficient $\alpha_{-30/+70}$ des verres optiques varie entre 4 et $9 \cdot 10^{-6}/K$.

1.3.3 Propriétés liées à la qualité

Certaines propriétés des matériaux optiques ne se traduisent pas facilement en nombre, mais elles résultent de l'observation attentive des défauts d'homogénéité. Les contrôles sont souvent réalisés en chambre noire, les pièces sont éclairées par un éclairage spécial et on les observe sur un fond obscur. L'œil humain est capable d'observer dans ces conditions une variation locale de l'indice correspondant à ± 0.00001 .

- Les **bulles** sont des éléments gazeux que l'on ne peut hélas pas complètement éviter lors de la fabrication des verres. Elles sont généralement sphériques dans le verre optique et allongées en forme de fuseau dans le verre glace. Il n'est tenu compte que des bulles et autres inclusions qui ont des dimensions supérieures à 0.05 mm. Pour caractériser un verre, on calcule la surface projetée en mm^2 de toutes les bulles et autres inclusions (supérieures à 0.05 mm) par 100 cm^3 de volume de verre (voir 2ème colonne du tableau suivant): il y a 4 qualités, la meilleure correspond au chiffre le plus bas.

Les bulles et inclusions provoquent la diffusion de la lumière et jouent un rôle dans l'apparence de l'objet. La qualité peut être critique lors de l'emploi de faisceaux LASER, ou autres faisceaux étroits.

Classe	
B0	0 - 0.029
B1	0.03 - 0.10
B2	0.11 - 0.25
B3	0.26 - 0.50

- Un **fil** (*Schlieren* en allemand, strie) est une variation locale de l'indice de réfraction provoquée par un mélange irrégulier de la masse de verre. Les opticiens diront facilement qu'un bloc de verre à « du sirop » en référence aux stries qui apparaissent dans un mélange d'eau et de sirop.
- La **neige** est une cassure dans le verre qui a été refermée à la suite d'un traitement thermique, comme par exemple, un moulage d'une lentille. La neige donne l'aspect de voile léger dans le verre. On appelle aussi neige, la présence de cristaux incorporés à la masse de verre. Le phénomène de dévitrification d'un verre provoque de la neige.
- **Homogénéité optique.** La variation de l'indice de réfraction dans un bloc de verre brut, correspondant à une coulée, donne une idée de l'homogénéité optique du bloc de verre dans lequel on usinera les pièces. On distingue 4 qualités allant de H1 avec une variation de l'indice n_d de $\pm 2 \cdot 10^{-5}$ à H4 où la variation n'est que de $\pm 1 \cdot 10^{-6}$. Il est évident que l'homogénéité optique d'un verre peut être quelconque si ce verre est utilisé comme support de la couche réfléchissante d'un miroir.
- **Biréfringence.** La fabrication d'un verre implique nécessairement la phase critique du refroidissement. Des tensions internes peuvent alors apparaître dans la masse et sont à l'origine de la biréfringence du verre. Une attention particulière doit être apportée au choix du verre, si les pièces optiques font partie d'un système dans lequel la polarisation de la lumière joue un rôle essentiel.
- **Coloration.** La coloration du verre optique est en général très faible. Une coloration jaune ou verte peut apparaître dans certains cas. La coloration correspond à une variation différentielle de la transmission du verre en fonction de la longueur d'onde: $t = t(\lambda)$. La coloration varie dramatiquement avec les variations minimales des quantités d'impureté dans le verre
- **Stabilité.** Les cristaux sont les corps les plus stables. Certains verres ont tendance à perdre leur état amorphe pour prendre une structure cristalline. Ce phénomène qui s'appelle dévitrification est rend le verre cassant.
- **Résistance à l'air humide, aux acides et alkalis.** Tous les verres sont plus ou moins attaqués superficiellement en atmosphère humide. Les crown baryum et les flints extra denses sont les plus sensibles. L'acide fluorhydrique attaque les verres, d'où son emploi dans le gravage des verres. Un verre attaqué par un agent chimique ou par l'air humide présente des taches; les opticiens parlent parfois d'oxydation. Pour cette raison, les verres les plus sensibles sont même difficiles à polir.

1.4 FABRICATION DES ELEMENTS EN VERRE OPTIQUE

L'industrie du verre optique est une petite industrie par rapport à d'autres secteurs des matières premières. Les produits peuvent être souvent adaptés à des exigences techniques particulières. En particulier, pour ce qui est des exigences particulière quand à la précision de certaine propriétés (indice, nombre d'Abbe) et de leur homogénéité, des tests et des sélections peuvent être effectués par le fabricant.

Néanmoins ces tests peuvent demander beaucoup de main d'œuvre et être par conséquent très coûteux. Dans la mesure du possible on se tient aux 100 verres qui figurent dans la liste préférentielle de Schott ou son équivalent chez ses concurrents.

Les grands disques (*blanks*) nécessaires à la fabrication de grands éléments optiques (miroirs ou lentilles) sont produits sur demande et nécessitent des long temps d'approvisionnement. Ils sont recuits pendant des durées importantes pour relâcher les tensions et homogénéiser l'indice. Les *blanks* de lentilles sont livrés poli plan-parallèle pour pouvoir en tester les variations l'indice

Anciennement, le verre était fabriqué en chauffant les composants dans un creuset en terre en remuant pour homogénéiser et en refroidissant précautionneusement la coulée. Le verre solide était ensuite brisé et on choisissait les morceaux de bonne qualité. Aujourd'hui le processus est mieux maîtrisé et on le coule en général en plaques qui sont ensuite tronçonnées.

Beaucoup de verres au Baryum ainsi que les verres aux terres rares (La) sont préparés dans des creusets en Platine parce que ces verres sont très corrosifs une fois fondus et réagiraient chimiquement avec des creusets en céramique, ce qui changerait les propriétés du verre. Pour les types produits en grande quantité, des processus continu ont été développé où les matériaux de base entrent d'un côté du four et le verre sort de l'autre côté.

La phase finale consiste en un recuit, ce qui correspond à en refroidissement lent qui peut durer plusieurs jours et qui permet aux tensions de se relâcher, ce qui assure l'homogénéité des propriétés optiques.

Les caractéristiques d'un verre peuvent varier d'une coulée à l'autre à cause de variations dans la recette et au recuit. D'ordinaire, les verres à faible indice ($n < 1.55$) sont livrés avec une tolérance sur l'indice de ± 0.001 et ceux d'indice supérieur avec une tolérance de 0.0015 .

De même le nombre d'Abbe à une tolérance de ± 0.3 pour $V < 46$, ± 0.4 pour $V = [46 \text{ à } 58]$ et ± 0.5 pour $V > 58$.

La plupart des verres prennent une couleur brune (voir noir) sous l'effet des radiations en raison d'une augmentation de l'absorption dans le bleu. Ceci qui affecte non seulement les appareils travaillant en ambiance radioactive, tels que les équipements spatiaux. Pour ce type d'application des fabricants proposent des verres spéciaux contenant du Cérium qui résistent à des doses de l'ordre de 10^6 roentgens. La silice fondue (voir plus bas) est extrêmement résistant au brunissement par radiation

Dans des applications « low cost » il arrive fréquemment que du verre glace soit utilisé. Son indice varie de 1.514 à 1.52 suivant le fabricant. Il peut être un peu vert à cause de son absorption dans le rouge et le bleu, mais aussi livrable en qualité blanche, sans teinte verdâtre. Dans des applications de basse précision, on peut même souvent utiliser les faces planes telles quelles. Par sélection, on peut même trouver des surfaces de très bonne qualité optique, le truc étant d'éviter les zones situées aux bords de la pièce coulée, le centre étant généralement bien meilleur.

1.5 LES CRISTAUX

Il est important de savoir que le **quartz fondu**, appelé aussi **verre de silice** ou **silice fondue**, n'est pas un cristal. C'est un matériau vitreux d'une grande importance, composé essentiellement de silice pure sous forme amorphe. Les raisons de son importance sont:

- Il possède un très petit coefficient de dilatation. ($0.5 \cdot 10^{-6} / K$ versus $7.1 \cdot 10^{-6} / K$ pour le BK7). Il peut par conséquent subir de grands chocs thermiques et servir d'interface entre un milieu chaud et un milieu froid.
- Il est très transparent aux longueurs d'onde de 200 nm à 4 μm . On l'utilise souvent comme enveloppe protectrice de sources à fort rayonnement ultra-violet, visible ou infrarouge. (D'où le terme de **lampe à quartz** pour une lampe à ultra-violets dont l'enveloppe est en silice, pour laisser sortir le rayonnement).
- Il a un bon coefficient de transfert thermique: 1.31 W/(m K) contre 0.5 pour les verres lourds.

Les **cristaux optiques** constituent une famille très importante par rapport à l'ensemble des verres optiques classiques. Ils sont naturels ou artificiels. Les principaux avantages des cristaux sont³:

- Excellent facteur de transmission dans des plages spectrales étendues.
- Excellente relation indice de réfraction - dispersion.
- Haute résistance mécanique.
- Résistance aux chocs thermiques
- Et surtout, leur structure cristalline leur permet d'avoir des états énergétiques favorables au lasing (génération d'un faisceau laser).

Le rubis a été le premier matériau qui a permis à l'effet **laser** de se produire. Le rubis est du saphir dopé avec 0.5% de chrome. D'autres laser infrarouge à haute puissance contiennent des cristaux synthétiques comme le YAG, Yttrium Aluminium Garnet, de formule chimique ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12} + \text{Nd}$).

³ Les cristaux sont également utilisés pour leurs propriétés de biréfringence.

Le tableau suivant résume quelques propriétés optiques et physiques importantes des cristaux les plus courants.

Nom	Formule	Limites de transmission en nm.		Point de fusion °C	n_D	V_D
		UV	IR			
FLUORURE DE BARYUM	BAF2	150	15 000	1280		
SULFURE DE CADMIUM	CDS	520	16 000	900		
CARBONATE DE CALCIUM	CACO3	300	5 500	900		
FLUORURE DE CALCIUM	CAF2	130	12 000	1360	1.4338	95.3
BROMURE DE CESIUM	CSBR	222	55 000	636		
QUARTZ FONDU	SiO2	200	4 500	1750	1.4585	
ARSENIURE DE GALLIUM	GAAS	100	11 000	1238		
GERMANIUM	GE	1 800	23 000	936		
FLUORURE DE LITHIUM	LiF	120	9 000	870	1.3920	98.6
FLUORURE DE MAGNESIUM	MGF2	110	7 500	1255		
OXYDE DE MAGNESIUM	MGO	250	8 500	2800		
CHLORURE DE POTASSIUM	KCL	210	30 000	776	1.457 (10µm)	
QUARTZ CRISTALLISE	SiO2	400	4 500	1470	E = 1.5533 O = 1.5442	68.7 69.9
SAPHIR	AL2O3	170	6 500	2030		
SILICIUM	Si	1 200	15 000	1420		
CHLORURE D'ARGENT	AGCL	400	30 000	457		
CHLORURE DE SODIUM	NACL	210	26 000	801	1.495 (10µm)	
SPINEL	MGO-AL2O3	900	6 000	2050		

Une quarantaine de *cristaux optiques* (mono- ou poly-cristallins) sont disponibles pour des applications particulières. Le plus souvent, ils sont synthétisés pour garantir leur pureté et leurs caractéristiques constantes.

1.5.1 Autre propriétés de cristaux particuliers

Certains cristaux présentent un **effet électro-optique** qui se manifeste quand une tension électrique provoque des modifications des propriétés optiques des matériaux, en particulier la biréfringence. Les cellules de Pockel et de Kerr utilisent cet effet.

L'effet **piézo-optique** (*stress birefringence*) est analogue à l'effet électro-optique, mais la pression mécanique, à la place de la tension électrique, provoque un changement de la biréfringence du cristal.

Les **cristaux photoniques** sont des structures périodiques de matériaux diélectriques ou métalliques conçues pour modifier la propagation des ondes électromagnétiques de la même manière qu'un potentiel périodique dans un cristal semi-conducteur affecte le déplacement des électrons en créant des bandes d'énergie autorisées et interdites. L'absence de modes propagatifs des ondes électromagnétiques (EM) dans de telles structures, dans une plage de fréquences ou de longueurs d'onde, est alors qualifiée de bande interdite (*band gap* en anglais).

La forme la plus simple de cristal photonique est une structure périodique à une dimension composée d'un empilement multicouche également appelé « miroir de Bragg ».

L'opale est une roche constituée de micro-billes de silice réparties selon un arrangement plus ou moins régulier. De fait, c'est un cristal photonique naturel, même si celui-ci n'a pas de bande interdite complète (i.e. la bande interdite ne s'étend pas selon toutes les directions cristallographiques principales du matériau). Le phénomène physique sous-jacent étant la diffraction de la lumière par la microstructure, la périodicité du cristal doit être de l'ordre de la moitié de la longueur d'onde de la lumière incidente pour générer des interférences, soit entre 200 et 400 nm pour fonctionner dans le visible. De même le ver marin *Aphrodita* possède des épines qui constituent des cristaux photoniques plus efficaces que ceux fabriqués par l'homme.

Ces structures sont actuellement la source de nombreuses expériences en optique telles que l'inhibition de l'émission spontanée, les miroirs omnidirectionnels à haute réflectivité ainsi que des guides d'ondes à faibles pertes. Les cristaux photoniques permettent déjà le contrôle et la manipulation de la lumière en vue d'applications de type télécom. Les cristaux à deux dimensions ont en effet atteint le niveau de maturité nécessaire pour le développement d'applications.



Bracelet monté d'une opale, cristal photonique naturel

1.6 LES VITROCERAMIQUES

Les **verres céramiques** ou **vitrocéramiques** sont des substances intermédiaires entre l'état vitreux et l'état cristallin. En fait, les verres céramiques sont composés de très petites structure cristallines (telle que TiO_2) dispersées dans une base de verre amorphe.

Ces céramiques sont réputées pour leur grande dureté, leur faible coefficient de dilatation et leur stabilité thermique et chimique.

Par exemple, le **Zerodur®** de Schott qui possède un coefficient de dilatation extrêmement bas:

$$\alpha_{20-300^\circ\text{C}} = + 0.05 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$$

est un verre céramique.

1.6.1 Fabrication et utilisation des céramiques

Le verre composé des inclusions cristallines suit le même procédé de fabrication que celui du verre normal. Une fois refroidie, la masse est amorphe. Mais après un traitement thermique bien contrôlé, un grand nombre de micro cristaux se développent et croissent autour des noyaux initiaux. La structure résultante est une masse amorphe qui enveloppe une phase cristalline. Certaines céramiques sont transparentes. Les pièces optiques en céramiques peuvent donc être moulées ou usinées, comme les pièces optiques standards, leur transformation en céramique ne dépendant que du traitement thermique ultérieur.

On utilise les céramiques pour les **miroirs** et autre éléments optiques nécessitant une très grande stabilité dimensionnelle, lors de grandes variations de température par exemple. Cette stabilité est obtenue, car les coefficients de dilatation des microcristaux et de la matrice en verre sont de signes opposés.

L'un des constituants s'allonge alors que l'autre se rétracte et les deux changements s'annulent l'un l'autre. Cela peut conduire à des problèmes de stabilité mécanique à long terme, à cause des contraintes internes ainsi générées.

Un autre type de verre a été développé par Corning, le ULE® pour Ultra Low Expansion. Il ne contient pas de microcristaux et ne nécessite pas de traitement thermique spécial. C'est au niveau moléculaire que l'annulation de la dilatation thermique s'effectue, ce qui a pour conséquence de diminuer considérablement les contraintes internes de ce verre. Sa fabrication fait intervenir un procédé de dépôt de matière dans une flamme contrôlée. L'ULE ne peut donc pas être utilisé pour des optiques dioptriques, mais seulement pour des miroirs.

1.7 AUTRES MATÉRIAUX POUR GRANDES OPTIQUES

Il existe aussi la possibilité de faire des miroirs métalliques, entre autre en aluminium et en béryllium dont la masse spécifique est faible et de très bonne tenue mécanique, mais hélas de coefficient de dilatation plus élevé.

Nous affichons ici quelques caractéristiques de matériaux souvent utilisés comme support de miroirs.

MATERIEL	MASSE SPECIFIQUE EN G/CM ³	COEFFICIENT DE DILATATION EN 10 ⁻⁶ / K
SILICE FONDUE	2.2	0.55
PYREX	2.35	3.2
ULE	2.21	0.02
ZERODUR	2.50	0.01
BERYLLIUM	1.82	12.4
ALUMINIUM	2.70	23.9
CARBURE DE SILICIUM	3.1	3.5
SUPER INVAR	8.13	0.1

1.8 LES POLYMERES OPTIQUES

Pour une production industrielle de masse dans laquelle les coûts et/ou les poids, par exemple, jouent un rôle important, les **polymères optiques** sont très intéressants.

Les deux polymères les plus courants sont le **PMMA**⁴ (appelé aussi **Plexiglas** ou **verre acrylique**) et le **Polycarbonate** (PC).

Le nombre de polymères ayant des propriétés optiques intéressantes est limité à une dizaine.

1.8.1 Caractéristiques des polymères par rapport aux verres

Les matériaux polymères ont des propriétés optiques et mécaniques moins intéressantes que celles des verres classiques. En effet, ils sont plus tendres, si bien que les surfaces sont très sensibles à l'abrasion et aux rayures qui peuvent provoquer des pertes supplémentaires due à la diffusion en surface. Les pertes par diffusion internes à la matière sont souvent plus grandes que pour la plus part des verres.

L'**homogénéité de l'indice** de réfraction des pièces moulées par injection est beaucoup moins bonne que celle des verres et l'indice lui-même peut varier au cours du temps.

Les polymères présentent une grande variation de l'indice de réfraction en fonction de la température et de l'humidité, sont hygrophiles, fluent sous pression et un coefficient de dilatation 10x supérieur à celui du verre.

Ces caractéristiques négatives font qu'il est plus difficile de concevoir des pièces optiques de haute précision avec de tels matériaux.

1.8.2 Avantages par rapport aux verres

Cependant la facilité avec laquelle on peut élaborer des pièces optiques de toutes sortes de formes avec un état de surfaces terminé au point de vue optique (état limité toutefois par la qualité de surface des moules), la faible masse spécifique, le faible coût de production (après amortissement des moules), et la possibilité d'injecter la structure mécanique et la partie optique en une seule pièce font des polymères un matériau utile.

Des **lentilles asphériques** sont aussi possibles par moulage, ce qui est très intéressant si l'on connaît la règle qui dit que chaque surface asphérique permet l'économie d'une lentille dans un système. Des composants diffractifs sont aussi produits couramment en polymères comme les **lentilles de Fresnel** que l'on trouve partout.

Une grande niche d'application est maintenant les trames de **micro-lentilles** en particulier pour les capteurs d'image CMOS.

La recherche d'un fournisseur d'optique en polymère est nécessaire en phase de conception déjà, car les exigences sur les matériaux et sur les pièces finies qui sont liées à l'optique étrangères aux fabricants de pièces plastiques mécaniques.

Comme les coûts des prototypes en polymères sont souvent élevés, il est d'usage de faire les prototypes avec des verres ayant des caractéristiques optiques proches des celles des polymères.

⁴ Polyméthylméthacrylate ou polyméthacrylate de méthyle.

1.8.3 Caractéristiques de quelques polymères optiques

Le tableau suivant indique à titre indicatif quelques propriétés de certains Polymères et du verre BK7, pour comparaison.

Propriétés	Acryl PMMA	Polystyrene	Polycarbonate PC	Methyl méthacrylate	BK7
Indice n_d	1.49	1.59	1.586	1.563	1.516
Nb d'Abbe V_d	57.5	30.9	30.3	34.7	64.2
Masse spécifique g/cm^3	1.190	1.055	1.200	1.090	2.51
Facteur de transmission pour épaisseur de 3 mm	0.92	0.88	0.89	0.90	
Température de service maximum °C	83	75	121	87	> 500
Résistance à l'abrasion 1= faible 5 = forte	4	2	1	3	5
Coefficient de dilatation linéaire $\cdot 10^{-6} / ^\circ K$	62	50	67.5	56	7
Nom commercial	Lucite, Diakon, Plexiglas	Dylan, Styron	Lexan, Merlon	NAS	

Les tensions internes générées lors du moulage et qui persistent même après retraitement thermique des pièces sont à l'origine de la biréfringence des polymères. Le dépôt de couches minces antireflets est plus difficile à effectuer sur les polymères à cause des limites thermiques et leur sensibilité aux réactions chimiques. On dépose sous vide de l'aluminium, de l'or ou de l'argent.

1.8.4 Fabrication des pièces optiques en polymères

Pour fabriquer des éléments optiques en matières plastiques, on utilise les procédés classiques, tels que

- la **fonte** dans un moule, sans mise en compression de la matière. Avec ce procédé, on utilise souvent des résines époxy qui se polymérisent sous l'effet d'un rayonnement UV.
- L'**injection**. Le polycarbonate (PC) et le PMMA sont des substances bien adaptées à la fabrication de pièces injectées. Le polycarbonate est le plus résilient⁵ de tous les thermoplastiques transparents. Le PMMA est un thermoplastique amorphe, dur et rigide, sensible à l'entaillage. Il peut être extrudé et coulé par injection. Il est souvent utilisé dans la fabrication des pièces optiques simples comme des fibres optiques, des lentilles de viseurs, des objectifs asphériques, ou des pièces très complexes comme des guides de lumière destinés aux scanners de bureau, par exemple.

Les **Compact Disc (CD)** sont en polycarbonate injecté sous pression à 300 °C dans un moule contenant l'**empreinte du CD** (*stamper*). Les parois relativement froides du moule refroidissent rapidement la matière thermoplastique et la solidifient avant son éjection. Une face contient la copie du *stamper*, l'autre est une surface miroir, sans aucun relief. L'empreinte est toujours obtenue par galvanoplastie. Les CD du commerce sont produits selon cette méthode qui est appelée **réplication**. Le moulage par injection et réplique d'une empreinte est également utilisé pour la fabrication de lentilles de Fresnel, de réseaux de micro-lentilles ou de micro-prismes, etc.. On compte qu'un moule est bon pour 10'000 cycles d'injection de qualité optique.

- L'**usinage** d'un bloc de matière au moyen d'un outil diamanté d'une machine-outil à commande numérique. Il est suivi éventuellement d'un polissage, toujours très difficile à réaliser à cause du manque de dureté de la matière.

D'une manière générale, la qualité et les tolérances atteignables pour des pièces produites en polymères optiques sont du même ordre que celles produites en verre. Par exemple, en production de masse, la variation de la distance focale d'une lentille peut être inférieure à 1%.

5

La **résilience** est une grandeur caractérisant la résistance d'une barre aux chocs transversaux

1.9 COLLES ET LIQUIDES

Les colles optiques sont utilisées pour coller des éléments optiques les uns aux autres. Cette opération sert à la fois à garantir le positionnement relatif des composants et à éliminer dans une large mesure les réflexions sur les dioptries. D'ordinaire, la couche de colle est très fine et n'influence pas les caractéristiques du système optique, mais certaines colles destinées à résister à de fortes variations de températures s'utilisent en couche de plus de 50 μm , ce qui peut devenir non-négligeable, en particulier dans les zones où les rayons ont des angles d'incidence importants.

L'**indice** de ces colles varie de 1.47 à 1.61, bien que la plupart soient dans la gamme 1.53-1.58. Le **nombre de Abbe** V est compris entre 35 et 45.

La colle historiquement la plus connue est le « baume du Canada » faite à base de résine de pin. On la trouve sous forme de liquide (dissoute) ou en cubes. Les éléments à coller sont chauffés, puis on frotte le bâton sur un des éléments pour fondre une petite quantité de colle et on presse les éléments ensemble en les glissant l'un contre l'autre pour évacuer les bulles et l'excès de colle. Enfin, on pose l'ensemble dans un gabarit pour le séchage en position. Le baume a un indice $n=1.54$ et $V=42$, donc entre les crown et les flints, ce qui est agréable. Malheureusement, son domaine de température est limité. Il se fend à basse température et fond à haute température.

Il existe maintenant un grand nombre de colle plastiques qui résistent très bien aux chocs et à la température. Elles sont soit durcies à chaud, soit durcies par exposition aux rayons ultra-violets, bien que certaines soient thermoplastiques. Les détaillants en composants optiques proposent un jeu de colles couvrant divers besoins (rapide/lent, dur/souple, etc.), mais dont le prix est élevé et la durée de vie non-utilisée limitée à quelques mois. Une goutte de colle est déposée au centre d'un composant et l'excès de colle et les bulles sont chassés par pressage avant la mise en gabarit pour le durcissement. La séparation des composants est alors extrêmement difficile. Elle peut se tenter par choc thermique dans un bain d'huile de ricin (150-200°C). L'indice de ces colles varie de 1.47 à 1.61, bien que la plupart soient dans la gamme 1.53-1.58 et V compris entre 35 et 45.

Une méthode spectaculaire d'attacher deux composants optiques est le contact optique: deux éléments de même rayon de courbure sont nettoyés scrupuleusement (souvent en terminant le nettoyage par une passe de pâte à polir optique (le « rouge », une résine de pin qui ne contient à proprement parler pas d'abrasifs) et ensuite appuyés l'un contre l'autre. Une fois d'air chassé, si aucune poussière n'est dans l'interstice, une attraction de niveau moléculaire a lieu qui va tenir les composants en place avec une force spectaculaire de 6 kg/cm^2 . Le seul moyen de séparer les composants est alors de produire un choc thermique qui va créer une dilatation différentielle (parfois avec une flamme sur l'interface) au risque de briser les pièces.

Les liquides optiques sont utilisés dans des applications particulières comme les objectifs de microscopes à huile (eau, huile de cèdre et glycérine) ou dans les réfractomètres dans lesquels l'indice du liquide doit être supérieur à l'indice mesuré pour éviter la réflexion totale. On utilise du alpha-bromonaphtalène ($n = 1.66$) et du Méthylène iodide ($n = 1.74$) pour les indices hauts. On en utilise aussi en sandwich pour réduire ou éliminer des différences de chemin optique.

1.10 BIBLIOGRAPHIE

- S. Musikant, *Optical Materials*, Marcel Dekker Inc., New York, 1985.
- W. J. Smith, *Modern Optical Engineering*, McGraw-Hill, 2000.
- A. S. DeVany, *Master Optical Techniques*, John Wiley & sons, New York, 1981.
- M.J. Weber, *Handbook of Optical Materials*, CRC Press LCC, 2003.
- www.cargille.com/ fournisseurs de liquides optiques.
- www.schott.com , www.hoyaoptics.com fournisseurs de verre optique brut.
- www.edmundoptics.de, www.rolyn.com , www.newport.com , www.mellesgriot.com , fournisseurs de composants optiques.

ON TROUVE D'EXCELLENTE INFORMATION SUR LES VERRES OPTIQUES ET LES VITROCÉRAMIQUES SUR LE SITE DE SCHOTT: WWW.SCHOTT.COM/OPTICS_DEVICES/ENGLISH/DOWNLOAD/

2. FIBRES OPTIQUES⁶

Une fibre optique est un fil en verre ou en plastique très fin qui a la propriété de conduire la lumière et sert dans les transmissions terrestres et océaniques de données. Elle offre un débit d'informations nettement supérieur à celui des câbles coaxiaux et supporte un réseau « large bande » par lequel peuvent transiter aussi bien la télévision, le téléphone, la visioconférence ou les données informatiques.

Le principe de la fibre optique a été développé dans les années 1970 dans les laboratoires de l'entreprise américaine Corning Glass Works.

Entourée d'une gaine protectrice, la fibre optique peut être utilisée pour conduire de la lumière entre deux lieux distants de plusieurs centaines, voire milliers, de kilomètres. Le signal lumineux codé par une variation d'intensité est capable de transmettre une grande quantité d'informations. En permettant les communications à très longue distance et à des débits jusqu'alors impossibles, les fibres optiques ont constitué l'un des éléments clef de la révolution des télécommunications optiques. Ses propriétés sont également exploitées dans le domaine des capteurs (température, pression, etc.) et dans l'imagerie ou encore dans l'éclairage.

Un nouveau type de fibres optiques, fibres à cristaux photoniques, a également été mis au point ces dernières années, permettant des gains significatifs de performances dans le domaine du traitement optique de l'information par des techniques non linéaires, dans l'amplification optique ou bien encore dans la génération de supercontinuum⁷ utilisables par exemple dans le diagnostic médical .

On peut modifier le trajet lumineux en choisissant un type de fibre particulier, qui permettra d'obtenir un chemin optique plus court et une dispersion modale moindre. Le signal optique subit dans la fibre des altérations tant au niveau de sa composition que de sa structure et de sa puissance, qu'il faut s'efforcer de minimiser et de compenser.

Hors de la fibre, des technologies telles que le multiplexage et les connections ou encore l'établissement d'un réseau et les techniques de codage, permettent de transmettre dans les meilleures conditions un maximum d'informations.



⁶ Ce chapitre est en grande partie repris du cours de Christian-Cyril Cordat (<http://mptranss.free.fr/cc/fibre.html>)

⁷ Un supercontinuum est un phénomène d'optique non-linéaire qui correspond à un élargissement de spectre très prononcé à partir d'une onde électromagnétique. Basiquement, on peut générer un supercontinuum en dirigeant un faisceau laser sur un matériau très non-linéaire: les effets non-linéaires élargissent le spectre du faisceau de départ au cours de sa traversée du matériau (réf. <http://fr.wikipedia.org/wiki/Supercontinuum>).

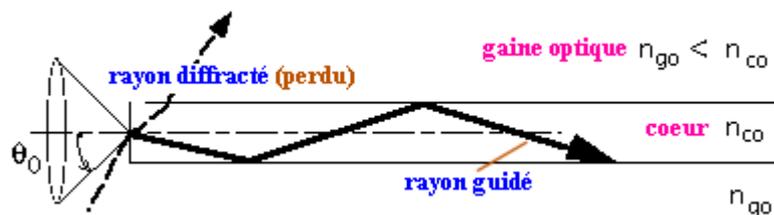
2.1 LE TRAJET LUMINEUX DANS UNE FIBRE

La dimension du cœur joue un rôle très important: en effet s'il est de quelques microns la lumière va s'y propager selon un seul mode, on parle alors de fibre unimodale; si par contre il est de l'ordre de plusieurs dizaines de microns on parlera de fibre multimodale dans laquelle la propagation de la lumière sera plus complexe avec des phénomènes de dispersion plus importants. C'est pourquoi la fibre unimodale est préférée en télécommunications à longue distance.

Pour mettre en équation le processus de guidage on utilisera soit la théorie de la propagation géométrique valable pour des cœurs de grande dimension (vis à vis de la longueur d'onde de la lumière considérée), mais aussi la théorie ondulatoire et les équations de Maxwell plus appropriée pour les faibles diamètres de cœur.

2.1.1 L'ouverture numérique

Considérons dans un premier temps une approche géométrique

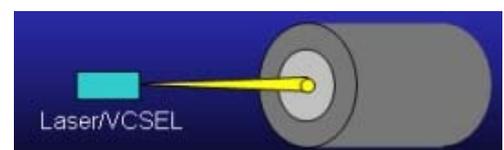
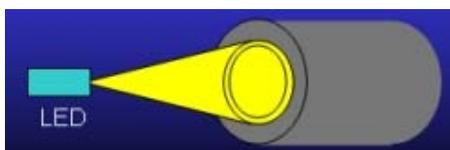


Le choix d'un profil à saut d'indice tel celui figuré ci-dessus entraîne les conséquences suivantes:

- pour qu'un rayon soit effectivement guidé dans la fibre il faut que sa direction à l'entrée se situe dans un **cône dit d'acceptance**
- un rayon guidé va subir une **réflexion totale** à l'interface des deux couches optiques.
- un rayon hors du cône d'acceptance sera simplement réfracté à l'entrée dans la fibre puis à l'interface des deux couches, il passera alors dans la gaine et sera perdu.
- l'angle d'acceptance permet de définir ce qu'on appelle l'**ouverture numérique** de la fibre, ouverture qui dépend bien évidemment des indices respectifs des deux couches optiques

$$O.N. = \sin \theta_0 = \sqrt{n_{co}^2 - n_{go}^2} \approx \sqrt{2n\Delta n}$$

Pour exploiter une fibre optique il faut donc faire converger la lumière à l'entrée à l'intérieur du cône avec une image qui soit inférieure au diamètre du cœur ce qui est relativement aisé à obtenir avec une source laser mais bien plus difficile avec une source classique.



2.1.2 Fibre multimode à saut d'indice

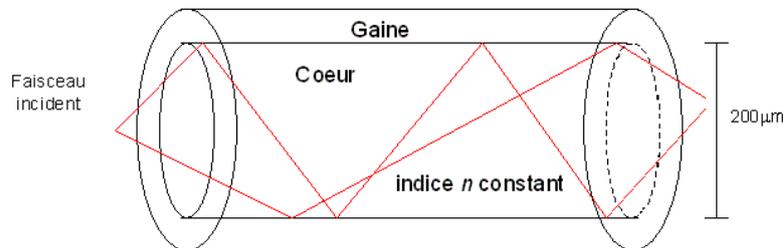


Figure 2.1: La fibre à saut d'indice

Les fibres à saut d'indice présentent un cœur transparent d'indice constant, et une gaine moins dense, il y a alors réflexion du rayon lumineux à la frontière entre les deux matériaux. Cependant, à cause du diamètre du cœur, le chemin optique varie, ce qui est gênant puisqu'un même signal se retrouve étendu à la sortie (voir section 2.3).

2.1.3 Fibre multimode à gradient d'indice

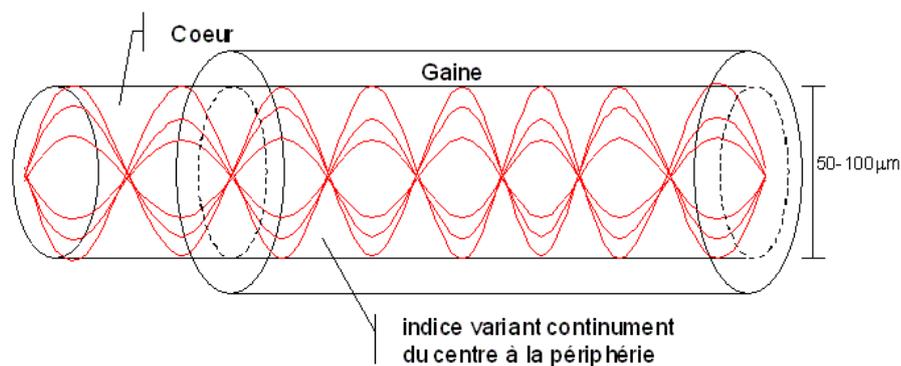


Figure 2.2: La fibre à gradient d'indice

Ici l'indice varie peu à peu du centre à la gaine, la forme de la trajectoire est plus sinusoïdale car le rayon est dévié au fur et à mesure qu'il s'éloigne du centre. La variation de chemin optique est ici plus faible car le cœur a un diamètre moindre. L'étalement du signal est moins important grâce à la variation de l'indice.

Les fibres à gradient d'indice ont été spécialement conçues pour les télécommunications. Leur cœur n'est plus homogène, l'indice de réfraction décroît depuis l'axe jusqu'à l'interface suivant la loi:

$$n(r) = n_{co} \sqrt{1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a}\right)^\alpha}$$

avec

r = distance à l'axe,

$\Delta = n_{co} - n_{ga} \ll n_1$,

α = exposant de profil d'indice voisin de 2

2.1.4 Fibre monomode

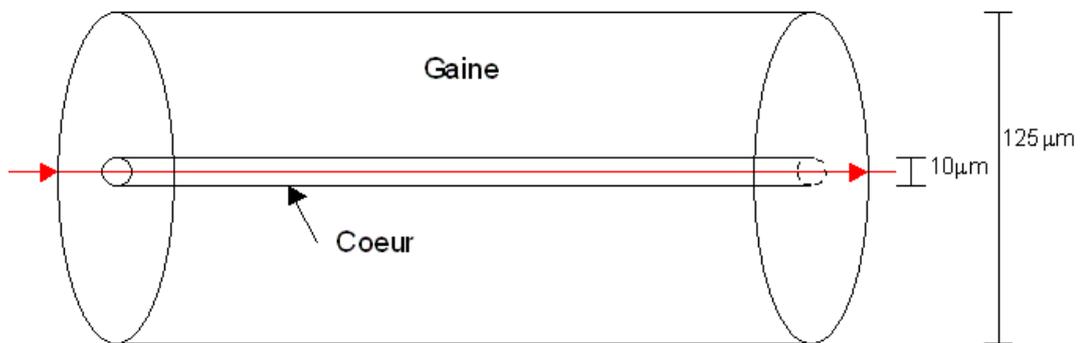


Figure 2.3: La fibre monomode

Dans une fibre monomode, on obtient un seul mode grâce à la très faible dimension du cœur (diamètre de 10 μm et moins). Ainsi le chemin de la lumière est imposé, il n'y en a qu'un seul: celui du cœur. Le verre ou la silice sont généralement utilisés dans le cœur. Il existe aussi des fibres optiques monomodes à cristal photonique.

2.2 MODES DE PROPAGATION

Les modes sont l'expression des différents chemins optiques que peut suivre le signal dans la fibre.

En effet, les ondes planes associées aux rayons totalement réfléchis **interfèrent**. Parmi tous les angles d'inclinaison φ , **certains** correspondent à une condition de phase qui construit une interférence identique tout le long de l'axe z: ce sont les **modes guidés**.

Le nombre de modes (guidés) dans une fibre à saut d'indice peut être calculé par l'expression expérimentale suivante:

$$N_m \cong \frac{1}{2} \left(\frac{2\pi \cdot r_{co} \cdot O.N.}{\lambda} \right)^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{2\pi \cdot r_{co} \cdot \sqrt{n_{co}^2 - n_{go}^2}}{\lambda} \right)^2 = \frac{1}{2} V^2$$

V est le paramètre du guide ou fréquence normalisée.

$$V = k r_{co} \sqrt{n_{co}^2 - n_{go}^2} \cong k r_{co} \sqrt{2\bar{n} \cdot \Delta n}$$

avec $k =$ nombre d'onde $= 2\pi / \lambda$

$r_{co} =$ rayon du cœur de la fibre

La valeur de V détermine le régime d'opération et, en particulier, la transition entre un fonctionnement unimodale et multimodale.

- Si $V < 2,4$ un seul mode peut de propager: c'est ce qu'on appelle le mode fondamental. On opère dans le régime unimodale de la fibre. On dit aussi que la fibre est **unimodale**.
- Si $V > 2,4$ plusieurs modes peuvent de propager. La fibre est **multimodale**.

Il est à noter que le paramètre V dépend non seulement des données de la fibre

$$O.N. = \sqrt{n_{co}^2 - n_{go}^2}$$

$r_{co} =$ rayon du cœur,

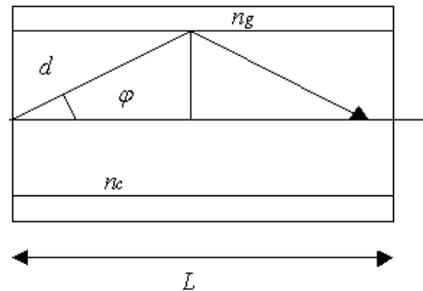
mais aussi de $k = 2\pi/\lambda$ et donc de la longueur d'onde d'opération λ .

Rappelons que l'ouverture numérique traduit l'angle d'entrée des faisceaux lumineux dans la fibre. On voit que le nombre de modes dépend du diamètre du cœur au carré.

Il est donc important de minimiser le diamètre du cœur si on veut limiter le nombre de modes de la fibre. La valeur des indices et la longueur d'onde choisie influent, mais dans une moindre mesure.

2.3 DISPERSION MODALE

Expliquons la dispersion modale:



Le plus court chemin est sur l'axe optique est

$$t_{\min} = \frac{L}{v_{co}} = \frac{L}{c/n_{co}} = \frac{L n_{co}}{c}$$

La longueur du chemin ℓ non axial est maximale quand le rayon est orienté suivant l'angle critique. On a pour ℓ (somme des d):

$$\ell = \frac{L n_{co}}{n_{go}}$$

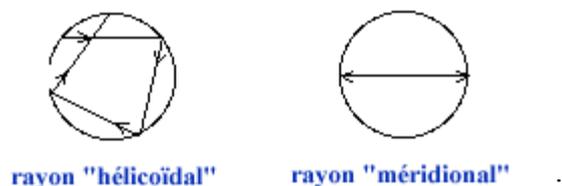
et donc

$$t_{\max} = \frac{\ell}{v_{co}} = \frac{\ell n_{co}/n_{go}}{c/n_{co}} = \frac{L n_{co}^2}{c n_{go}}$$

$$\Delta t_{im} = t_{\max} - t_{\min} = \frac{L n_{co}^2}{c n_{go}} - \frac{L n_{co}}{c} = \frac{L n_{co}}{c} \left(\frac{n_{co}}{n_{go}} - 1 \right)$$

Pour $L=1$ km, $n_c = 1.43$, $n_g = 1.42$, $\Delta t = 33$ ns, ce qui n'est pas négligeable.

On voit que déjà sur 1 km, la dispersion modale introduit un retard notable, c'est pourquoi les fibres multimodes ne sont utilisées que pour des réseaux locaux.



Dans une fibre multimodale, la plupart des rayons sont hélicoïdaux.

A chaque inclinaison φ correspond un groupe de rayons auquel on peut associer un mode. Chaque mode est caractérisé par sa vitesse de phase V_p liée à l'angle φ par

$$V_p = \frac{c}{n_{co} \cos(\theta)}$$

Il y aurait donc, dans cette approche purement géométrique, autant d'inclinaisons que de modes.

2.4 BANDE PASSANTE

Comme la lumière voyage à

$$v_{co} = \frac{c}{n_{co}}$$

La déformation spatiale d'un signal sera:

$$v_{co} \Delta t_{im} = \frac{c}{n_{co}} \Delta t_{im}$$

Pour décoder un signal il faut une séparation d'au moins deux fois l'étalement d'un pic. Donc les impulsions doivent être séparées d'au moins $2 \Delta t_{im}$.

La fréquence maximale [Hz] possible (bande passante) sera:

$$BP = \frac{1}{2\Delta t_{im}} = \frac{1}{\frac{2L n_{co}}{c} \left(\frac{n_{co}}{n_{go}} - 1 \right)}$$

Ce qui de fait limite l'utilisation des fibres multimode à des courtes distances.

2.5 AUTRES PHÉNOMÈNES DE DISPERSION

2.5.1 Dispersion chromatique

Lorsque l'on envoie un signal lumineux, il y a plusieurs longueurs d'onde présentes, soit parce que la source est étendue, soit parce que la source présente en réalité un pic centré sur λ . Par exemple, une LED (*light emitting diode*), a un pic d'une largeur de l'ordre de la dizaine de nanomètres et un laser un pic d'une largeur de 1 nm et moins.

Le mode fondamental a une constante de propagation définie par

$$\beta = n_c \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{C} n_c$$

Le temps de propagation par unité de longueur est obtenu en dérivant la constante de propagation par rapport à ω , tout en tenant compte du fait que **l'indice de réfraction n_c dépend de λ** :

$$\tau' = \frac{\Delta t}{L} = \frac{\partial \beta}{\partial \omega} = \frac{n_c}{C} + \frac{\omega}{C} \frac{\partial n_c}{\partial \omega} = \frac{n_c}{C} + \frac{\omega}{C} \frac{\partial n_c}{\partial \lambda} \frac{\partial \lambda}{\partial \omega}$$

En considérant:

$$\omega = 2\pi \frac{C}{\lambda} \Rightarrow \frac{\partial \lambda}{\partial \omega} = -2\pi \frac{C}{\omega^2} = -\frac{\lambda}{\omega}$$

Le temps de propagation linéique devient:

$$\tau' = \frac{1}{C} \left(n_c - \lambda \frac{\partial n_c}{\partial \lambda} \right)$$

La *dispersion chromatique linéique* (par unité de longueur) *spécifique* (par différence unitaire de longueur d'onde) traduit les variations de τ' par rapport à λ :

$$\delta'_c = \frac{\partial \tau'}{\partial \lambda} = \frac{1}{C} \left(\frac{\partial n_c}{\partial \lambda} - \frac{\partial n_c}{\partial \lambda} - \lambda \frac{\partial^2 n_c}{\partial \lambda^2} \right) = -\frac{\lambda}{C} \frac{\partial^2 n_c}{\partial \lambda^2}$$

Cette grandeur est généralement exprimée en $\text{ps}\cdot\text{km}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$, et présente des valeurs négatives (≈ -80) dans la plage des 800 nm, passe par zéro vers 1300 nm, et grimpe jusqu'à 20 pour la fenêtre des 1550 nm, la plus utilisée pour les télécommunications à longue distance.

Pour cette raison, des progrès technologiques importants ont été faits pour soit décaler (*dispersion shifted fibers, DSF*), soit élargir (*dispersion flattened fibers, DFF*) la caractéristique de dispersion des matériaux pour que la dispersion soit minimale aussi dans la troisième fenêtre.

Finalement, la dispersion chromatique, qui exprime l'élargissement d'une impulsion dont la source a une extension spectrale de $\Delta\lambda$, après avoir parcouru une longueur L dans une fibre, est égale à:

$$\Delta t_c = D_c = \delta'_c \cdot \Delta\lambda \cdot L$$

La dispersion chromatique est moins importante par rapport à la dispersion modale, mais elle devient fondamentale dans le cas d'une fibre monomode, pour laquelle la dispersion modale est nulle. La bande passante d'une fibre monomode peut donc s'exprimer de la façon suivante:

$$BP = \frac{1}{2\Delta t_c} = \frac{1}{2 \cdot \Delta\lambda \cdot L \cdot \frac{\lambda}{C} \frac{\partial^2 n_c}{\partial \lambda^2}}$$

Pour corriger la dispersion chromatique, on fait appel à un réseau de Bragg à pas variable.

2.5.2 Réseaux de Bragg

Un réseau de Bragg ou réflecteur de Bragg distribué est un réflecteur de grande qualité utilisé dans des guides d'onde, par exemple dans des fibres optiques. Il s'agit d'une structure dans laquelle alternent des couches de deux matériaux d'indices de réfraction différents, ce qui provoque une variation périodique de l'indice de réfraction effectif dans le guide.

À la frontière entre deux couches, il se produit une réflexion partielle des ondes. Pour les ondes dont la longueur d'onde est égale à environ quatre fois l'épaisseur optique d'une couche, les réflexions se combinent par interférences constructives, et les couches agissent comme un miroir de grande qualité.

En effet, la relation de Bragg donne:

$$\lambda_{\text{Bragg}} = 2 \cdot n \cdot \Lambda$$

où n est l'indice effectif du milieu, et Λ le *pas* du réseau, égal à l'épaisseur d'un *couple* de couches. Si chacune de ces couches a une épaisseur L , le pas vaut $\Lambda = 2L$, soit:

$$\lambda_{\text{Bragg}} = 4 \times \underbrace{n \cdot L}_{\text{épaisseur optique}}$$

La plage de longueurs d'onde réfléchies est appelée la *bande de coupure photonique*. Dans cette plage, la lumière ne peut pas se propager dans la structure.

La réflectivité R du réseau de Bragg est donnée par la formule suivante:

$$R = \left[\frac{n_o(n_2)^{2N} - n_s(n_1)^{2N}}{n_o(n_2)^{2N} + n_s(n_1)^{2N}} \right]^2,$$

où n_o , n_1 , n_2 et n_s sont les indices de réfraction respectifs du milieu environnant, des deux matériaux utilisés de façon périodique, et du substrat; N est le nombre de couples de couches (couche d'indice n_1 , couche d'indice n_2).

La bande passante $\Delta\nu_0$ de la bande de coupure peut être calculée ainsi:

$$\Delta\nu_0 = \frac{4\nu_o}{\pi} \arcsin\left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1}\right),$$

où ν_o est la fréquence centrale de la bande.

Ainsi, augmenter le nombre de couples de couches d'un réseau de Bragg augmente la réflectivité du miroir, et augmenter la différence d'indice de réfraction entre les deux matériaux augmente à la fois la réflectivité et la bande passante.

Un réseau de Bragg à pas constant se comporte comme un filtre pour une longueur d'onde donnée. Avec un réseau à pas variable, on travaille sur toute une bande spectrale, on ralentit les longueurs d'onde les plus rapides. En optimisant la variation continue du pas du réseau, le signal issu de ce réseau retrouve sa forme d'origine.

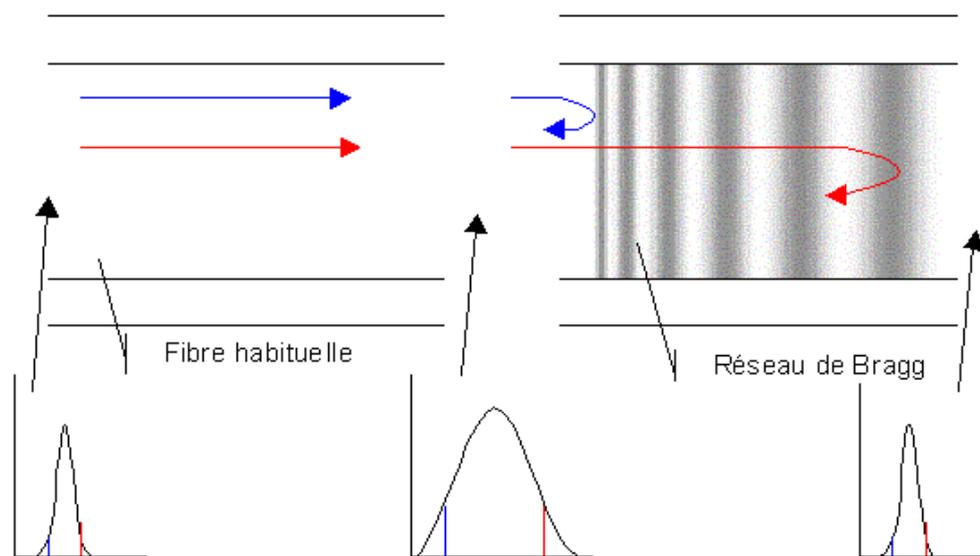


Figure 2.4: Effet sur un signal d'une fibre à réseau de Bragg à pas variable

Un réseau de Bragg est inscrit dans la fibre par holographie ou bien par chauffage, tension ou pression, sur un segment de quelques centimètres. Par contrôle actif, on obtient un réseau à variations continues et un gain identique pour toutes les longueurs d'onde.

2.5.3 La dispersion de polarisation

Il existe aussi un phénomène de dispersion de la polarisation de la lumière dans la fibre.

Les imperfections de fabrication produisent un cœur de forme plutôt elliptique. De plus, à l'utilisation, les courbures déforment aussi la fibre; on a alors un milieu anisotrope: au vu du faisceau, il y a des indices différents selon la direction. Dans la fibre, on constate une biréfringence: un rayon non polarisé incident est décomposé en deux rayons (extraordinaire et ordinaire) polarisés linéairement mais l'un en mode transverse magnétique [TM] et l'autre en mode transverse électrique [TE].

Plusieurs corrections existent:

- Un système électrique peut, de loin en loin sur la fibre, capter le signal et après analyse émettre le signal comme à son origine. On perd ici l'efficacité du traitement tout optique.
- Des fibres à maintien de polarisation comme les fibres à cœur elliptique ou les fibres PANDA ou TIGER.

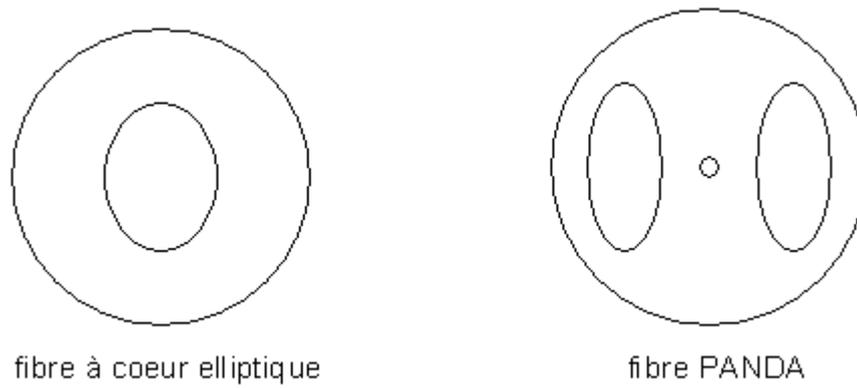


Figure 2.5: Fibres à maintien de polarisation

Avec ces fibres, on peut contrôler la polarisation le long de la fibre.

La perte de polarisation est utile pour l'utilisation des fibres comme capteurs: lorsque la fibre subit des contraintes, le signal est modifié et on peut l'analyser.

2.6 ATTÉNUATION

L'atténuation caractérise l'affaiblissement du signal au cours de la propagation. Les causes des pertes dans les fibres sont multiples. Il y a :

- l'absorption par les impuretés,
- la diffusion par les impuretés ou par les défauts d'interface cœur-gaine et la diffusion de Rayleigh qui est la diffusion de la lumière sur les molécules du matériau (la silice),
- les courbures et les micro-courbures de la fibre,
- la diffusion et la réflexion aux épissures.

Ces effets combinés contribuent à détériorer la transmission de la fibre. L'atténuation minimum d'une fibre unimodale standard des télécommunications se situe à 1550 nm; elle est de l'ordre de **0,2 dB/km**.

Soient P_o et P_i les puissances à l'entrée et à la sortie d'une fibre de longueur L . L'atténuation se traduit alors par une décroissance exponentielle de la puissance en fonction de la longueur de fibre:

$$\alpha = \frac{dB}{km} = \frac{-10 \log\left(\frac{P_o}{P_i}\right)}{L}$$

$$\frac{P_o}{P_i} = 10^{-\frac{\alpha L}{10}}$$

où α est le coefficient d'atténuation usuellement exprimée en décibels par kilomètre (dB/km). L'atténuation va varier suivant la longueur d'onde. La figure ici bas caractérise l'atténuation spectrale de la silice:

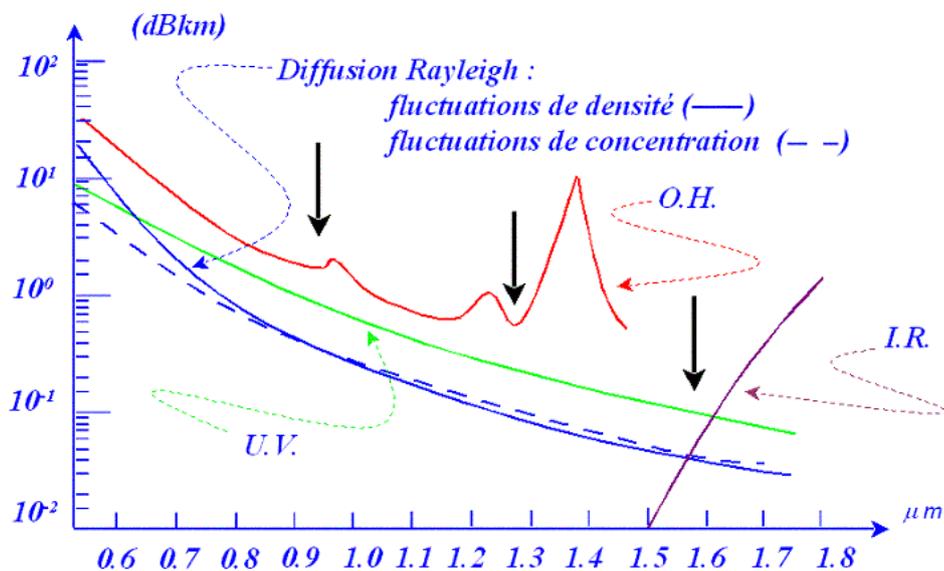


Figure 2.6: Profil de l'atténuation spectrale de la fibre optique faite de silice

On voit que plusieurs paramètres contribuent à faire perdre de la puissance au signal optique:

- Tout d'abord ce que l'on appelle la diffusion Rayleigh qui traduit à la fois l'effet des impuretés, des imperfections, des craquelures et des variations d'indice.
- Ensuite les effets de vibration de la liaison hydroxyde (OH oxygène hydrogène), que l'on ne peut pas supprimer, et qui présentent un pic de forte atténuation autour de 1400 nm.
- On a aussi une influence des ultraviolets et des infrarouges (UV et IR).

En superposant ces profils d'atténuation, on remarque trois fenêtres spectrales à l'atténuation assez faible (flèches noires sur la figure):

- autour de 900 nm,
- autour de 1300 nm
- et autour de 1550 nm.

En particulier les fibres en silice connaissent un minimum d'atténuation vers **1550 nm**. Cette longueur d'onde du proche infrarouge sera donc privilégiée pour les communications optiques.

De nos jours, la maîtrise des procédés de fabrication permet d'atteindre couramment une atténuation aussi faible que **0,2 dB/km** à 1 550 nm: après 100 km de propagation, il restera donc encore 1 % de la puissance initialement injectée dans la fibre, ce qui peut être suffisant pour une détection.

Si l'on désire transmettre l'information sur des **milliers de kilomètres**, il faudra avoir recours à une réamplification périodique du signal, le plus généralement par l'intermédiaire d'amplificateurs optiques qui allient simplicité et fiabilité.

Il est à noter que le signal subira des pertes supplémentaires à **chaque connexion** entre fibres, que ce soit par des traverses ou bien par soudure, cette dernière technique réduisant très fortement ces pertes.

Il existe certaines fibres (chez Lucent Technologies) qui n'ont pas de pic dû à OH vers 1400 nm, elles présentent alors une très large fenêtre exploitable de 1335 à 1625 nm. Ainsi, en minimisant certains effets d'atténuation, on peut élargir les fenêtres utilisables par le signal.

Cependant, il n'est pas possible de supprimer totalement tous les effets qui atténuent le signal. Ainsi, le signal pour parcourir une longue distance doit être ré-amplifié régulièrement.

Pour cela, on utilise ce que l'on appelle des EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier ou amplificateur à fibre dopée à l'erbium). Le dopage est une technique qui consiste à inclure un élément chimique dans la composition de la fibre. On choisit un élément qui possède des propriétés intéressantes au niveau de sa structure électronique. On privilégie ce que l'on appelle les terres rares (de la famille de lanthanides comme le Praseodymium, le Terbium, l'Ytterbium ou encore l'Erbium).

Les ions Erbium sont excités par les longueurs d'onde suivantes:

514, 532, 667, 800, 980, 1480 nm

Si ces longueurs d'onde parcourent la fibre dopée, les ions Erbium se trouvent excités à un niveau d'énergie supérieur, il y a alors une émission stimulée, et de l'énergie photonique est libérée par exemple vers 1520 à 1620 nm si l'on choisit les longueurs d'onde soulignées. Ceci est intéressant, car on se situe précisément dans les longueurs d'onde des télécoms. Ce phénomène est appelé effet RAMAN stimulé (voir annexe).

Un EDFA se présente comme un segment de quelques mètres de fibre dopée à l'erbium.

Pour que le dopage aie un effet, il faut envoyer dans l'EDFA un signal de pompe et un signal d'information:

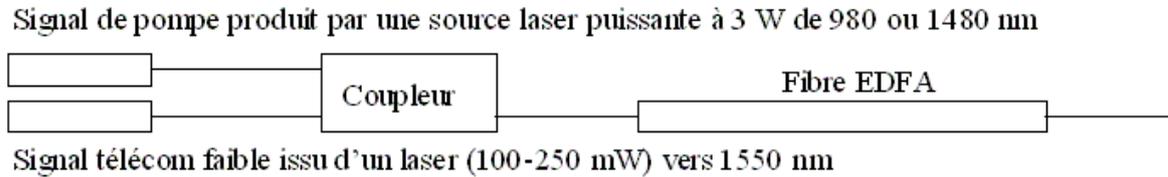


Figure 2.7: Amplificateur à fibre dopée à l'Erbium

Dans une fibre multimode, on peut envoyer le signal de pompe dans la gaine.

Une technique courante de dopage est le codopage Erbium-Ytterbium: le faisceau de pompe est absorbé par l'Ytterbium qui est excité à un niveau d'énergie supérieur, l'énergie est alors transférée à l'Erbium:

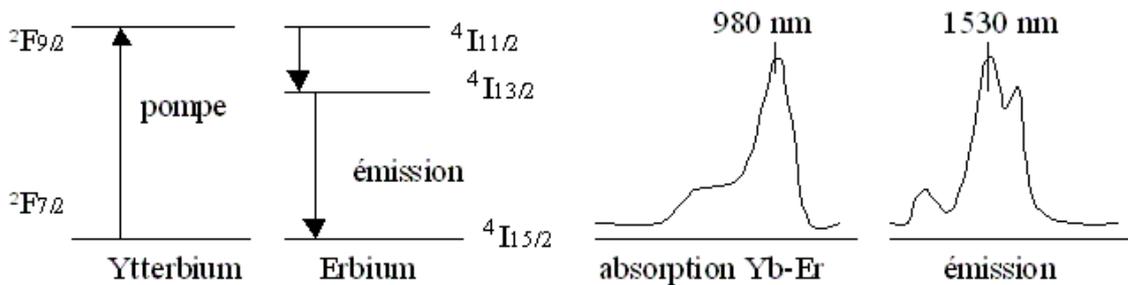


Figure 2.8: Effet du codopage Ytterbium - Erbium

L'effet RAMAN correspond donc au couplage entre les vibrations du réseau cristallin et les vibrations de la source laser. On choisit un laser précis pour obtenir après décalage RAMAN un signal dans la fenêtre télécom.

Il est de plus important de maximiser le transfert d'énergie entre le signal de pompe et le signal télécom (à l'heure actuelle plus de 50%). L'avantage avec le dopage est que l'on amplifie l'ensemble des l vers 1550 nm, et ceci est indépendant de la polarisation. Cependant le profil du gain n'est pas plat, et de plus la puissance se subdivise pour le nombre de longueurs d'onde.

Un autre souci est qu'il faut minimiser le bruit de ce qui est excité sans qu'on le veuille.

On a vu une situation où signaux de pompe et télécom étaient dans la même direction, mais dans la pratique, la logique veut qu'ils soient dans des directions opposées, ainsi le signal de pompe est le plus fort lorsque le signal télécom est le plus faible et inversement.

2.7 TECHNOLOGIES ENVIRONNANTES

2.7.1 Le multiplexage WDM et DWDM

A l'heure actuelle, le besoin en bande passante est une réalité effective. Mais poser une fibre a un coût non négligeable et on ne peut pas se permettre de poser plusieurs fibres pour augmenter la quantité d'informations transportables. Il est donc nécessaire de faire en sorte d'exploiter au maximum les fibres existantes déjà installées. D'où l'idée du multiplexage: transmettre plusieurs signaux simultanément dans la même fibre.

Le Wavelength Division Multiplexing (WDM) et le DenseWDM (DWDM) sont des technologies permettant de transmettre plusieurs signaux simultanément dans une même fibre optique. On cherche dans tous les cas à optimiser l'utilisation de la fenêtre de transmission de la fibre (environ 100nm). (Il existe aussi le CoarseWDM qui est une autre norme).

Le WDM sépare chaque canal de 0.8nm et le DenseWDM de 0.2nm. L'intérêt de la fibre optique est que ces signaux ne peuvent se confondre, à la réception ils seront parfaitement distingués.

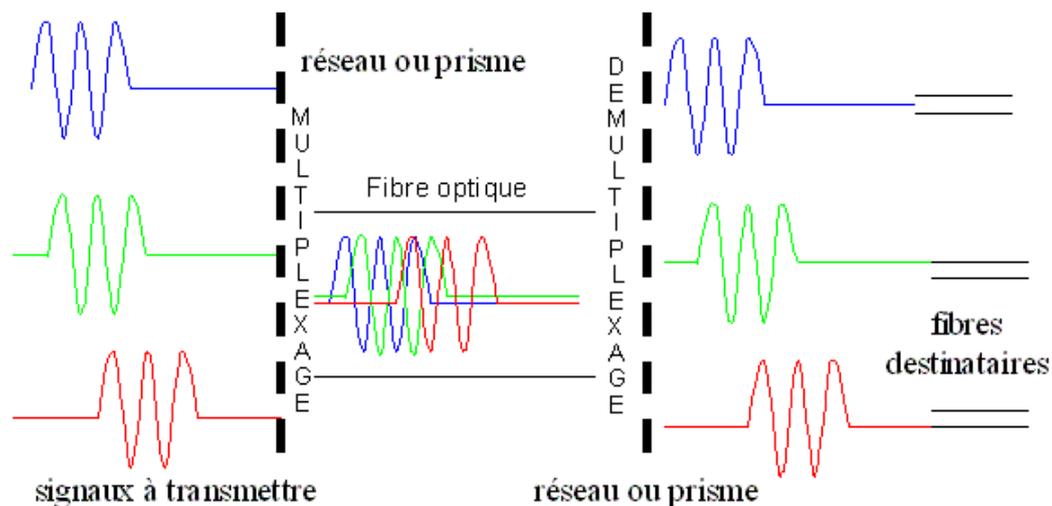


Figure 2.9: Principe du multiplexage

On réalise le multiplexage principalement dans des fibres monomodes. A partir de plusieurs laser à spectre fin ou d'un seul à spectre large, on réalise un échantillonnage de longueurs d'onde de l'ordre du 1/10ème de nanomètre. On parvient à l'heure actuelle à réaliser 256 canaux dans une seule fibre.

Un système que l'on appelle OADM (Optical Add Drop Multiplexer), permet d'inclure un canal supplémentaire ou d'en retirer un à un lieu précis de la fibre, ceci se réalise à l'aide de filtres (comme des réseaux de Bragg par exemple).

En réalisant un échantillonnage de plus en plus fin, on pourra obtenir des fibres à très large bande passante, et ajouté au système OADM (avec le principe d'une autoroute: on peut aller d'un bout à l'autre ou sortir - rentrer en un lieu précis) cela permettra d'obtenir un réseau flexible. Le multiplexage est ainsi une technologie incontournable des télécommunications par fibre optique.

2.7.2 Les connexions

On réalise bien qu'en montant un réseau de fibres optiques, il faut à un moment ou à un autre connecter des fibres entre elles; autant en électronique, il est facile de connecter deux fils de cuivre par soudure ou épissure, autant joindre parfaitement deux fibres est une tâche contraignante et minutieuse. Il est essentiel de minimiser les pertes car c'est aux connexions que le signal perd l'essentiel de sa puissance:

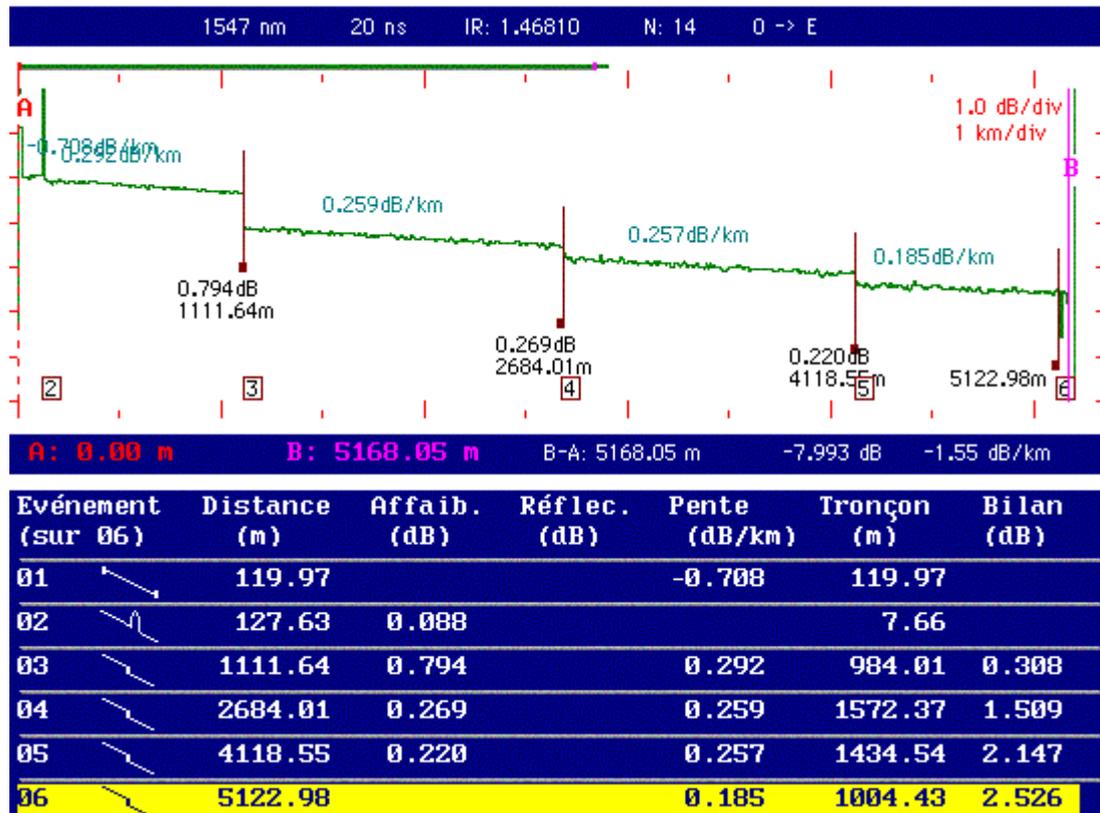


Figure 2.10: Pertes aux connexions sur une ligne optique

Sur cette figure réalisée grâce à l'instrumentation du laboratoire de l'ARUFOG, on voit aux événements 3, 4 et 5 que l'affaiblissement du signal est non négligeable aux lieux de connexion entre les différentes fibres.

Il faut réunir de nombreuses conditions afin de réaliser une connexion qui minimisera les pertes: - aplanir la face de contact, ou la rendre parfaitement sphérique par polissage, en veillant à ce qu'elle soit perpendiculaire à l'axe optique - aligner les deux fibres (voir la figure suivante) - traiter les faces avec un revêtement antiréflexion - vérifier la soudure si soudure il y a et l'entourer d'une gaine de protection

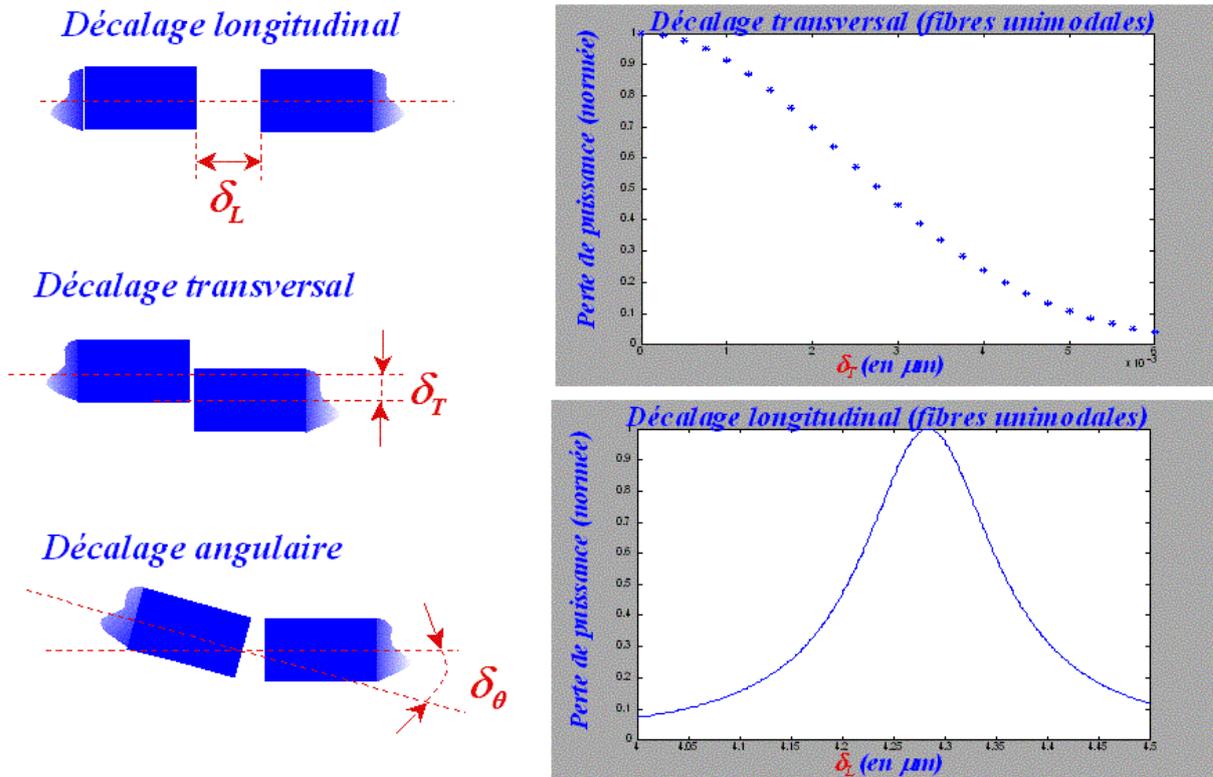


Figure 2.11: Les différents décalages au raccordement de fibres et leur affaiblissement

Réaliser toutes ces conditions sur un câble de l'ordre du micromètre en laboratoire et plus encore sur le terrain n'est pas chose aisée et requiert du matériel de pointe.

Si on ne soude pas les fibres, il faut alors travailler avec les nanotechnologies: des commutateurs microélectromécaniques sur lesquels on monte des miroirs assurent la redirection du signal à la sortie d'une fibre vers d'autres fibres (on est à l'échelle de la microseconde, mais des technologies nouvelles sont de l'ordre de la nanoseconde -trioxyde de lithium niobium- et même de la picoseconde -avec des polymères-).

2.7.3 Les réseaux optiques

La principale application de la fibre optique se trouve dans les télécoms; on construit donc des réseaux à l'échelle d'une entreprise, d'une ville, d'une région, d'un pays et même au-delà (câbles transatlantiques).

A l'échelle d'un pays, un réseau comporte ce que l'on appelle une épine dorsale (en anglais *backbone*) assurée par une fibre à très haut débit, qui dessert des réseaux plus locaux sur toute sa longueur; une telle ligne ne boucle pas, c'est ce que l'on appelle pour un réseau, une topologie point à point. De telles fibres parcourent plusieurs centaines de kilomètres et requièrent un certain nombre d'amplificateurs, qu'il faut minimiser car ils augmentent le coût du réseau.

On installe sur ces lignes des OADM qui permettent de délivrer un canal précis à un réseau local.

L'autre forme de réseau correspond à une plus petite échelle: ce sont les LAN et les MAN (Local et Metropolitan Area Networks). Ils prennent, eux, une topologie en anneau, en maille de filet, ou en étoile, pour assurer les communications et échanges de données à l'échelle locale (entreprises, particuliers). Ces réseaux, ont pour centre névralgique un hub qui rassemble les fonctions de multiplexage - démultiplexage, d'amplificateur, de commutateur avec les autres réseaux, de gestion et de compatibilité entre les différents protocoles d'échanges (TCP/IP, modes synchrones et asynchrones, SONET (synchronous optical network), SDH (synchronous digital hierarchy)...). Les noeuds de ces réseaux comportent un OADM.

Le souci dans tout réseau est le risque de panne: pour éviter de bloquer toute communication, on associe souvent deux fibres, ainsi, si l'une se rompt, l'autre peut prendre le relais. Mais ceci nécessite une intervention rapide: on implémente donc dans le système un protocole de contrôle actif qui peut répondre instantanément en cas de disfonctionnement en redirigeant le trafic vers la seconde fibre, mais ceci augmente le coût global du réseau.

Pour établir un réseau de coût minimal avec un fonctionnement assuré en toutes circonstances, il existe des algorithmes informatiques qui permettent de construire des réseaux autorisant toutes les communications.

2.7.4 Le codage du signal

L'information transportée est codée en binaire (succession de 0 et de 1).

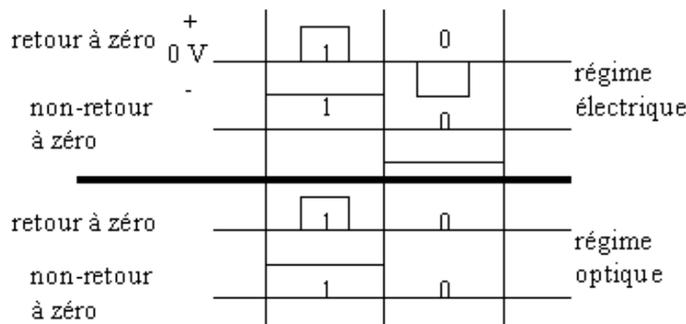


Figure 2.12: Le binaire en électrique et en optique

Les différents moyens de modulation que l'on connaît s'appliquent aussi en optique (modulation d'amplitude, modulation de fréquence et modulation de phase):

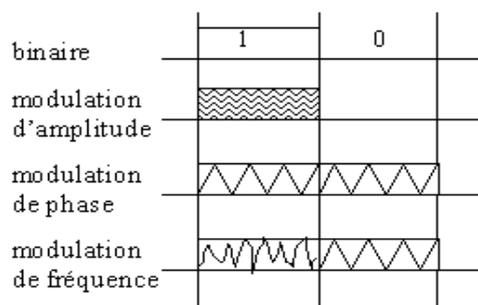


Figure 2.13: Le codage de l'information optique

Lors de la transmission cependant, un bit (0 ou 1) peut se transformer, ce qui peut créer une erreur. On pourrait alors pour éviter cela envoyer plusieurs fois le même signal (2, 3 ou plus), mais cela consomme beaucoup de bande passante pour une efficacité limitée.

On peut adopter une solution qui s'appelle le code de Hamming: à l'aide d'une matrice de codage précise, on transmet un signal, qui, à sa réception, est décodé par une matrice de décodage associée à celle de codage et assure de retrouver le signal d'origine même si une erreur a surgi. La transmission codée demande plus de bande passante que le signal simple, mais est très efficace: on minimise le taux d'erreur en n'augmentant que légèrement la quantité d'informations à transmettre.

2.8 EXERCICES

1. Combien de modes peuvent se propager dans une fibre avec un cœur de diamètre $20 \mu\text{m}$, indices $n_{\text{co}} = 1,461$, $n_{\text{ga}} = 1,456$ à 850 nm ? **Rep.** 159.
2. Un signal de $5 \mu\text{W}$ entre dans une fibre de 100 m , à la sortie on a $1 \mu\text{W}$. Quel est le coefficient d'absorption de la fibre ? **Rep.** -70 dB/km .
3. Quelle est la dispersion modale et la bande passante dans une fibre de 1 km dont l'indice du cœur est $1,446$ et l'angle θ_0 définissant le cône d'acceptance est de 35° ? **Rep.** 431 ns $2,32 \text{ MHz}$.
4. Déterminer le rayon maximum d'une fibre avec $n_{\text{co}} = 1,46$, $n_{\text{ga}} = 1,457$ à 1250 nm pour un régime unimodal. **Rep.** $10,2 \mu\text{m}$.

3. ANNEXES

3.1 LA BIRÉFRINGENCE ÉLECTRIQUE

Un diélectrique, solide, liquide ou gaz, transparent, optiquement isotrope, devient biréfringent lorsqu'il est soumis à un champ électrique. Ce phénomène de biréfringence provoquée, découvert par Kerr (en 1875), est connu sous le nom d'effet Kerr.

Le diélectrique soumis au champ E devient optiquement équivalent à un cristal biréfringent uniaxe, dont l'axe serait parallèle à E . La différence de ses indices principaux, extraordinaire n_e , et ordinaire n_o , est proportionnelle au carré du champ :

$$n_e - n_o = K l E^2$$

l est la longueur d'onde de la lumière utilisée, K la constante de Kerr du corps étudié, pour la lumière utilisée.

Exemple: la constante K du nitrobenzène liquide pour la lumière jaune du sodium vaut environ $+3.10^{-12}$ (l en mètre, E en V/m).

On a pu montrer que l'effet Kerr est dû à un effet d'orientation des molécules du corps par le champ électrique. Ce phénomène présente une particularité remarquable. Il s'établit et disparaît en des temps très brefs (de l'ordre de 10^{-10} s). Si une cellule de Kerr reçoit un faisceau de lumière d'intensité constante, l'intensité de la lumière émergente suit fidèlement les modulations du champ électrique, même si ces modulations sont très rapides. Ce fait est mis à profit par exemple pour enregistrer le son des films sonores.

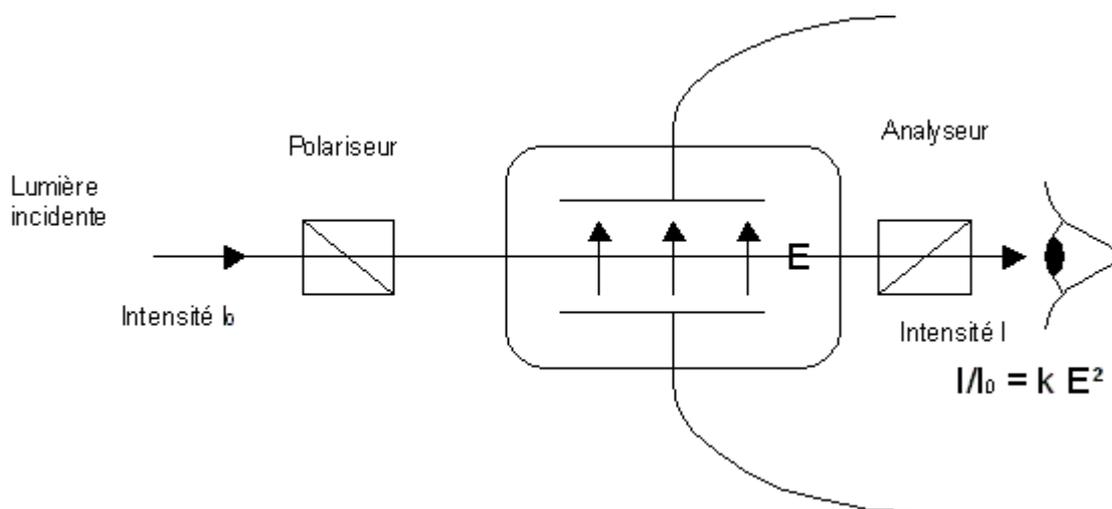


Figure: Schéma de principe d'une cellule de Kerr

3.2 EFFET RAMAN

Le spectre de la lumière diffusée, par certaines substances, le benzène par exemple, sous l'effet d'une radiation excitatrice monochromatique, comprend la radiation excitatrice (effet Rayleigh) accompagnée par un certain nombre de radiations satellites dont les fréquences se répartissent symétriquement de part et d'autre de la fréquence excitatrice N :

$$\dots N_3 N_2 N_1 N N_1' N_2' N_3' \dots$$

Ce type de diffusion est appelée effet Raman, du nom du physicien qui l'a découvert expérimentalement (en 1928).

Les radiations dont les fréquences sont inférieures à N , dénommées anciennement radiations négatives, sont appelées aujourd'hui radiations Stokes -- car elles obéissent à la loi de Stokes --, celles dont les fréquences sont supérieures à N , les anciennes radiations positives, sont aujourd'hui dénommées radiations anti-Stokes.

L'effet Raman obéit à une loi expérimentale remarquable et simple: les différences entre les fréquences de chacune des radiations satellites et celle de la radiation excitatrice dépendent uniquement de la substance diffusante, et nullement de la fréquence excitatrice. L'ensemble de ces différences de fréquence $n_1, n_2, n_3 \dots$

$$n_1 = N - N_1 = N_1' - N; n_2 = N - N_2 = N_2' - N, \text{ etc.}$$

est appelé spectre Raman de la substance envisagée.

L'explication du phénomène fut d'abord demandée à l'électromagnétisme classique. Malgré quelques succès, cette tentative aboutit à un échec, car elle s'est révélée incapable d'expliquer un deuxième résultat expérimental bien établi: l'intensité des radiations Stokes est toujours très nettement supérieure à celle des radiations anti-Stokes.

Une explication plus complète a été obtenue en faisant appel à la physique quantique. Considérons les figures à la page suivante. Chaque fréquence Raman n représente, à la constante de Planck h près, la différence d'énergie entre l'état fondamental et chacun des états excités de la molécule étudiée.

Concurremment avec l'étude de leur spectre d'absorption, l'étude de leur spectre Raman donne d'utiles indications sur la structure des molécules. Selon la théorie quantique, le phénomène résulte de chocs individuels entre photon excitateur et molécule.

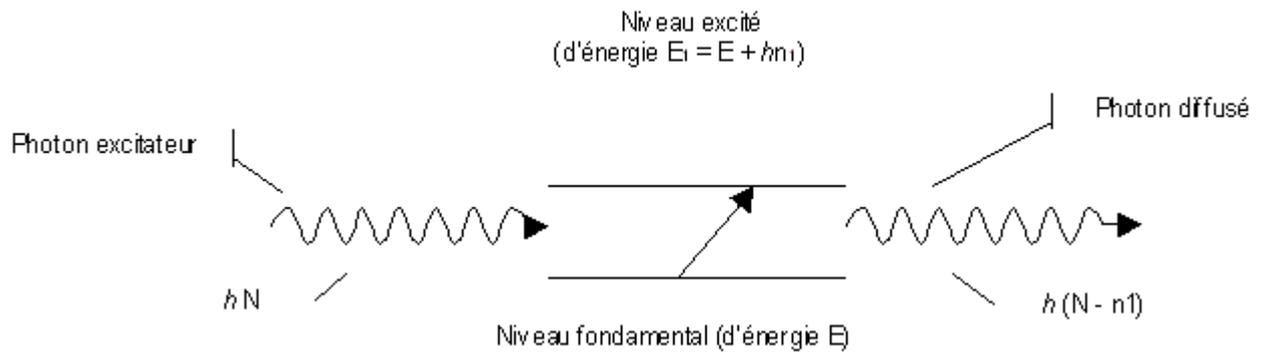


Figure 3.1: Radiations Stokes. La molécule absorbe l'énergie perdue par le photon

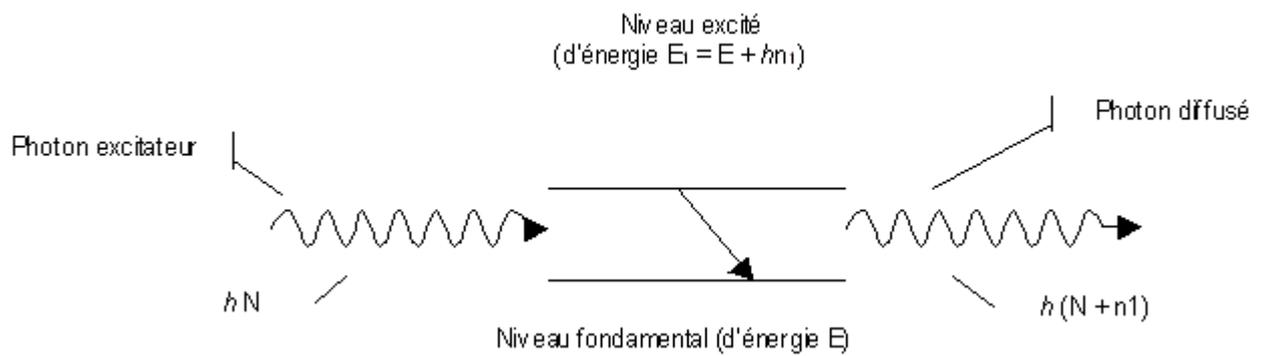


Figure 3.2: Radiations anti-Stokes. La molécule cède de l'énergie au photon