

Quelques matériaux et composants optiques

Le verre

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.

- Les verres sont classifiés en particulier selon leur dispersion chromatique

Rappel: la dispersion chromatique

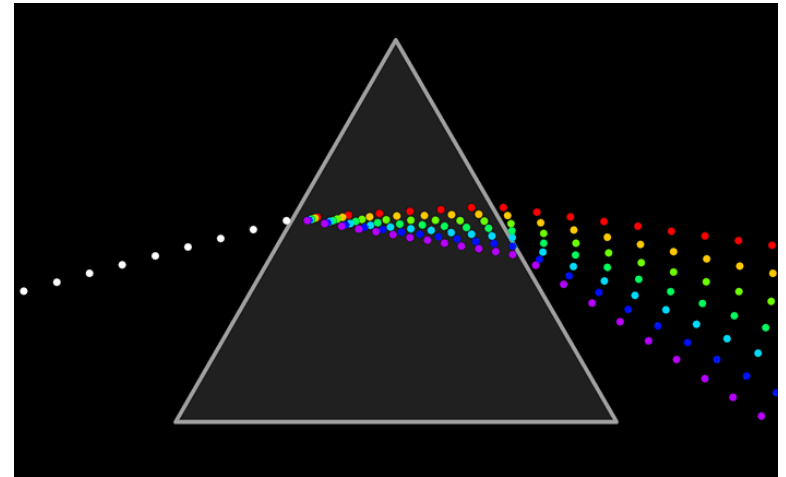
L'indice de réfraction d'un verre (et des autres matériaux) varie en fonction de la longueur d'onde, ce qui provoque une dispersion chromatique, particulièrement évidente avec un prisme..

Coefficient de dispersion ou **nombre d'Abbe** :

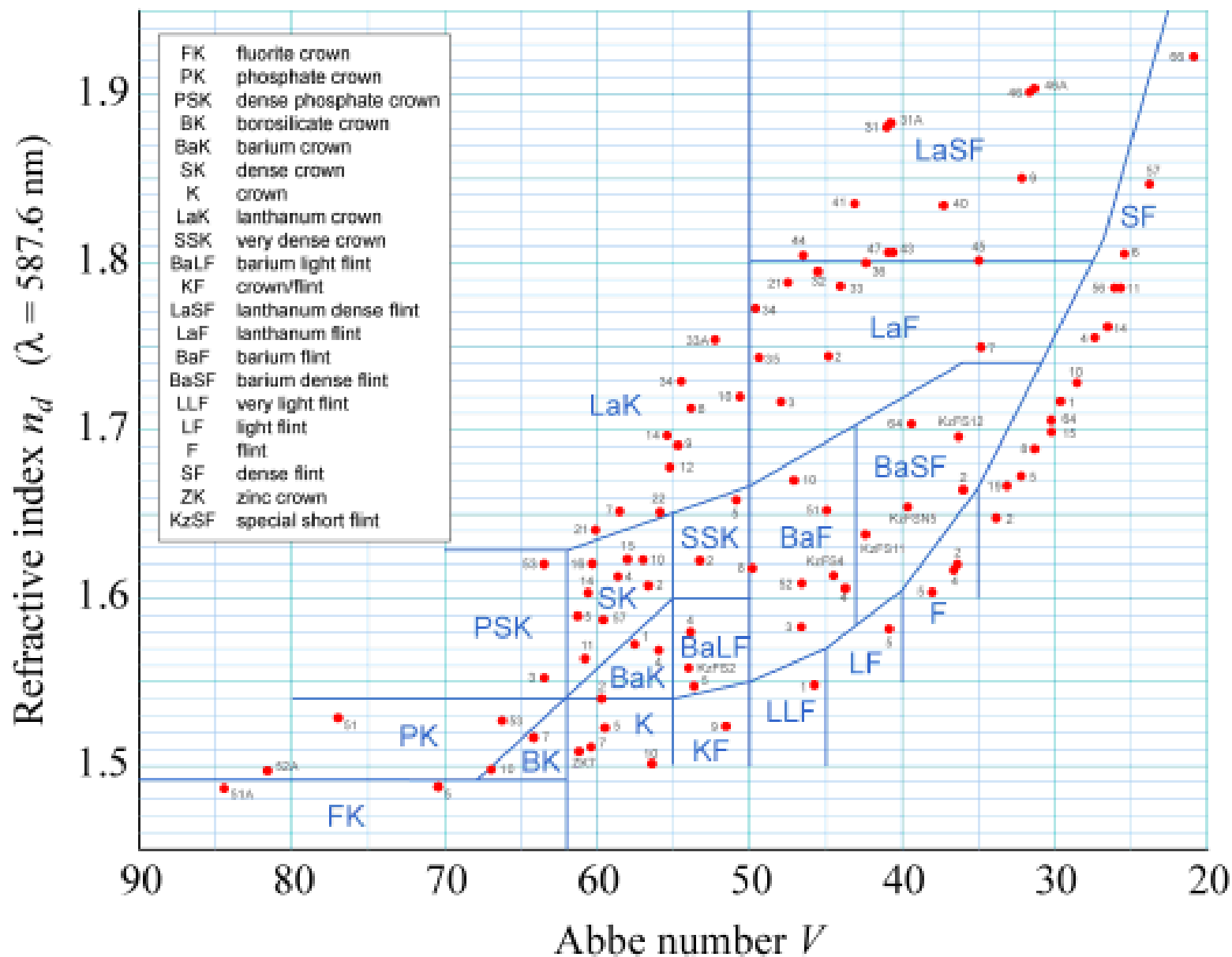
$$\nu = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C}$$

n_D = indice à 588 nm (raie de l'hydrogène)

F et C désignent deux raies de l'hydrogène (longueurs d'onde $\lambda_F = 486,1$ nm et $\lambda_C = 656,3$ nm)



Classification des verre – le diagramme de Abbe

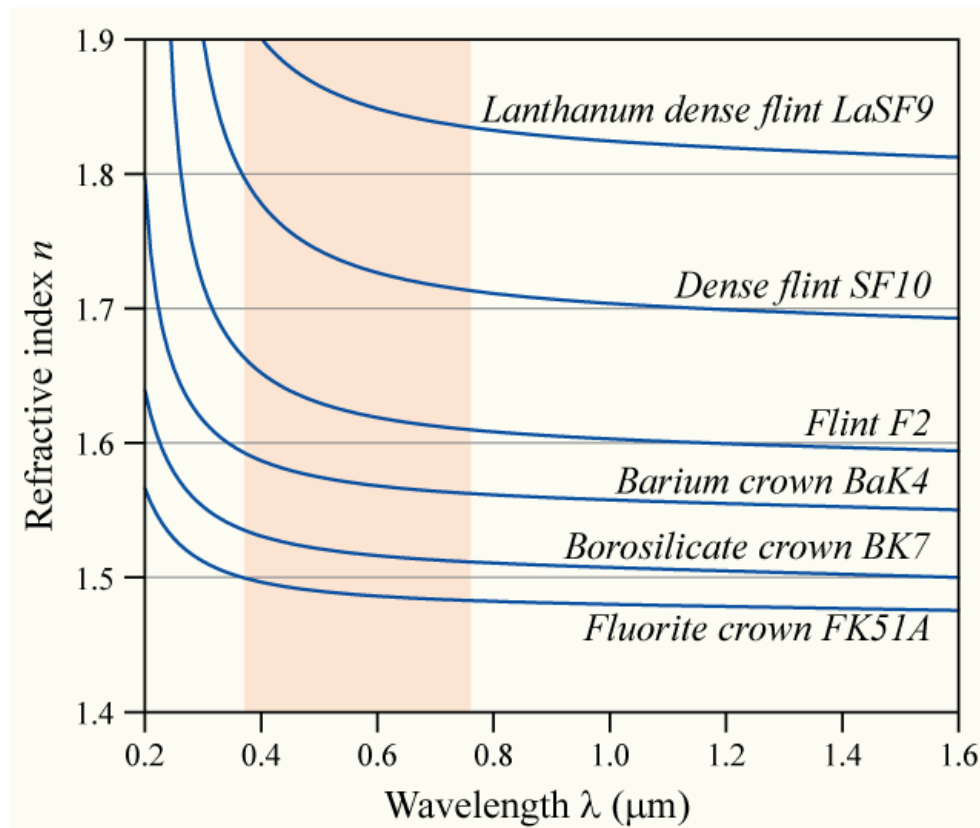


- On voit que les verres sont séparés en 2 familles: les « **crowns** » qui ont $V \geq 55$ si $n < 1.6$ et $V \geq 50$ si $n > 1.6$. De l'autre côté de cette limite se trouvent les « **flints** ».
- Le verre **crowns** contient des oxydes de sodium et de calcium et disperse peu (son nombre d'Abbe est 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.

Les principales «familles» des verres optiques

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

Propriété du verre - dispersion



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).

Formules analytiques

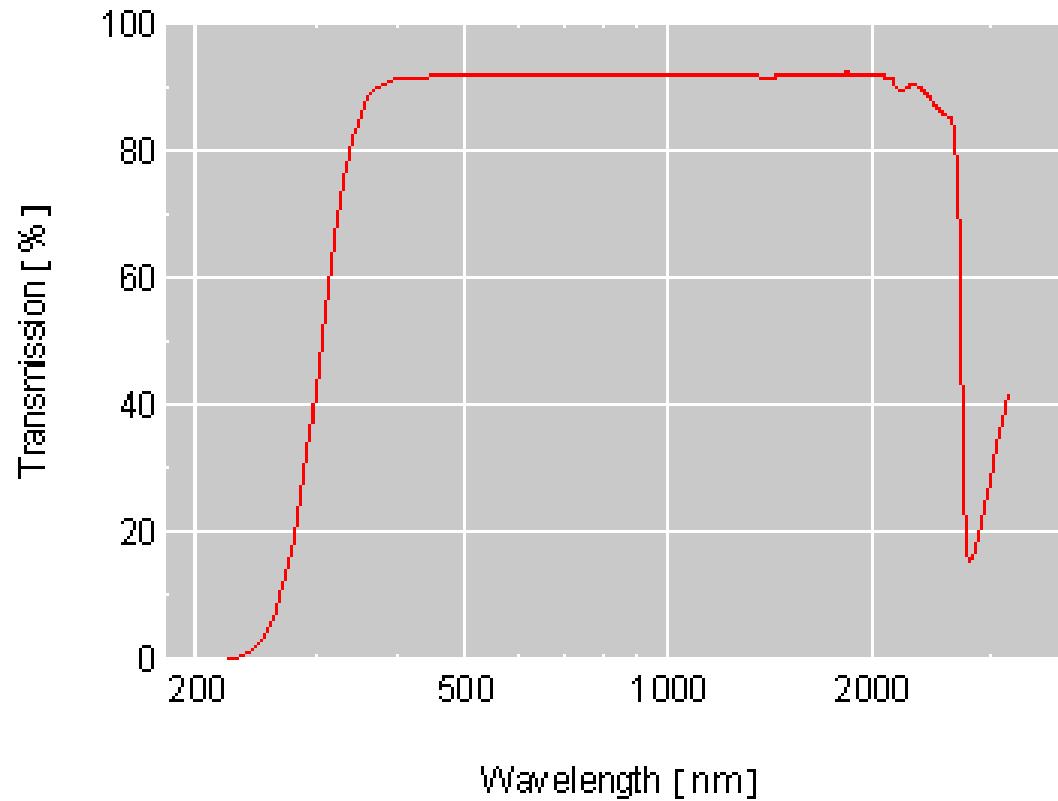
- Pour les verres, il existe aussi plusieurs formules empiriques permettant de calculer l'indice de réfraction en fonction de la longueur d'onde.

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

Propriété du verre - transmission

BK7



Propriété du verre - atténuation

Il est parfois 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 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 est donné par la formule suivante:

$$\phi = \phi_0 e^{-kx}$$

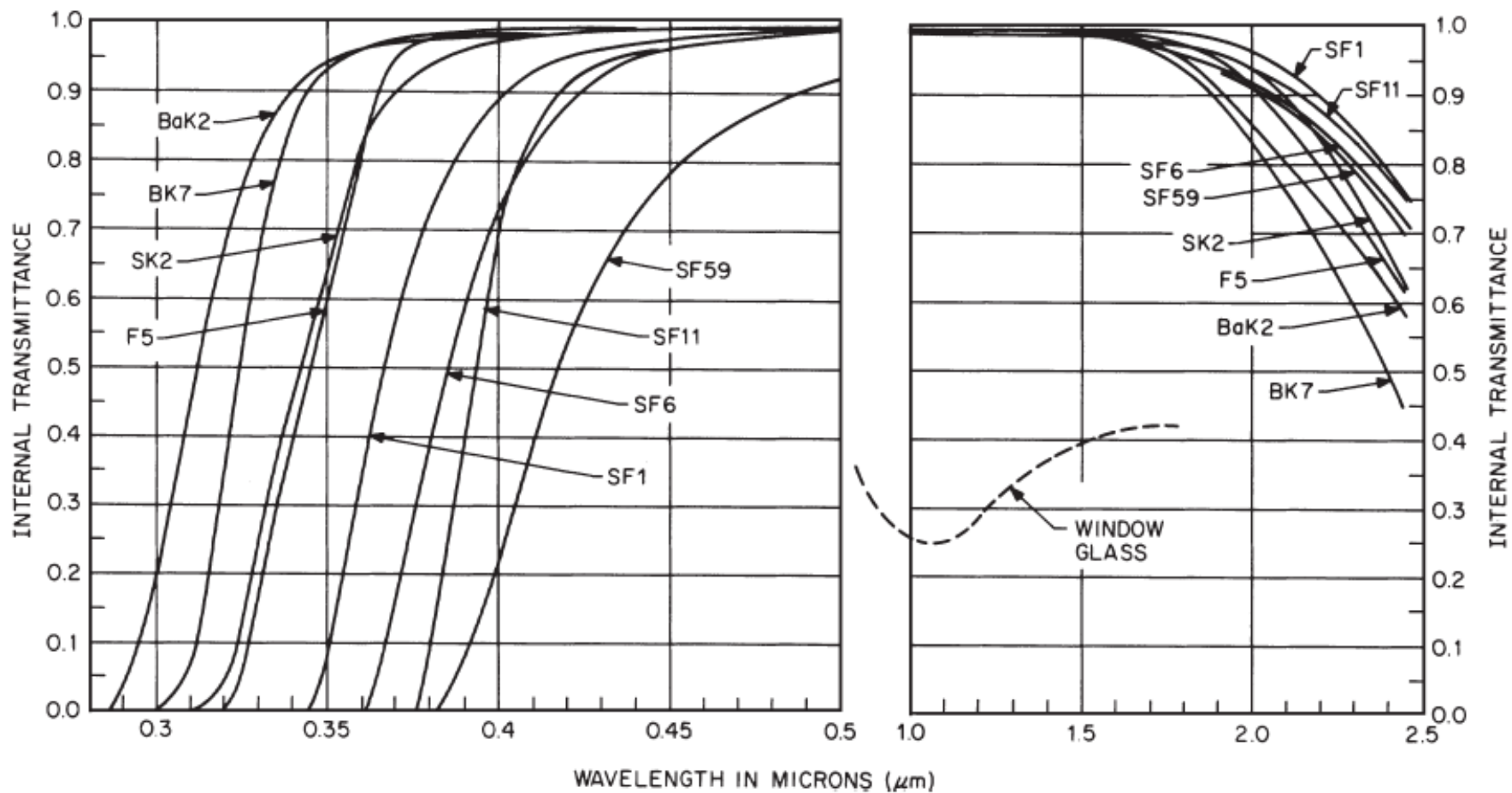
loi de l'atténuation dans un milieu absorbant

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 .

L'atténuation dépend en général de la longueur d'onde.



Transmission *interne* Φ/Φ_0 pour une épaisseur de 25 mm

Thermoelasticité

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

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

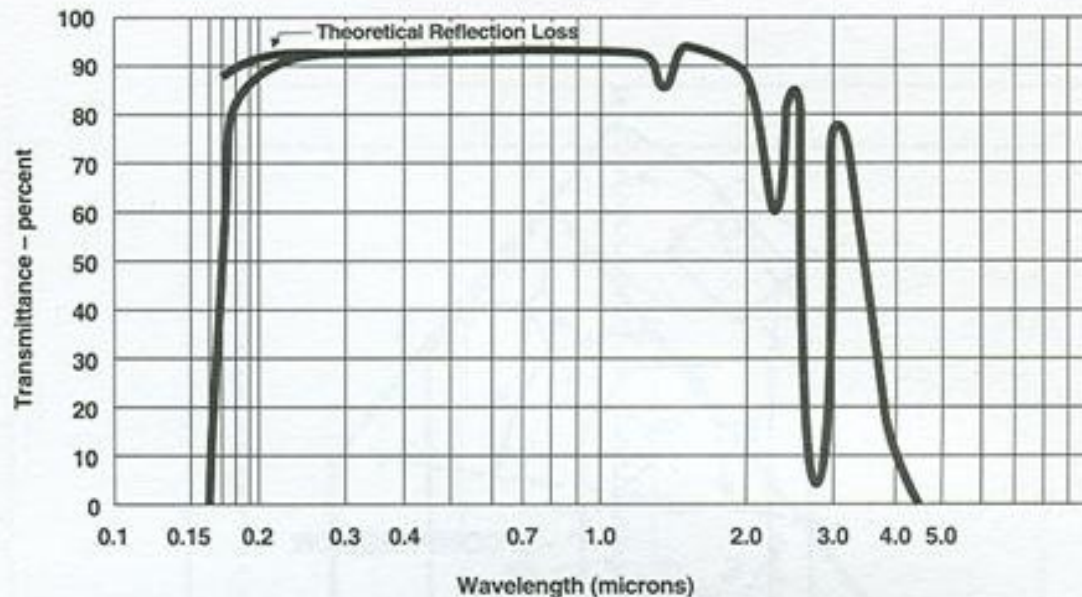
- Où Δl est la variation de longueur due à une élévation de température ΔT .
- α est le **coefficient de dilatation linéaire** (*Coefficient of Thermal Expansion, abrégé CTE*).
- Le coefficient $\alpha_{-30/+70}$ des verres optiques varie entre **4 et $9 \cdot 10^{-6}/K$** .

Verre de silice

- 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: $0,55 \times 10^{-6} /K$.
Il peut par conséquent subir de grands chocs thermiques et servir d'interface entre un milieu chaud et un milieu froid.
- Il a un bon coefficient de transfert thermique: $1,31 \text{ W}/(\text{m K})$ contre 0.5 pour les verres lourds.

Silice - transmission

- Il est très transparent aux longueurs d'onde de 200 nm à 4 mm. 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).



Transmission through 10mm Thickness of Optical Fused Silica

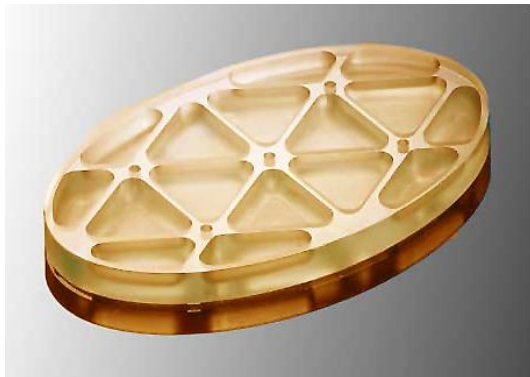
Les vitrocéramiques

- 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.

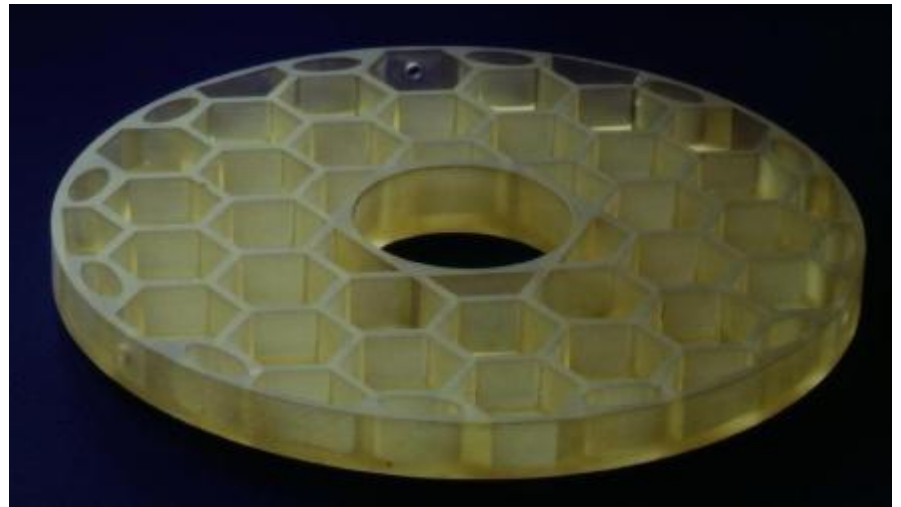
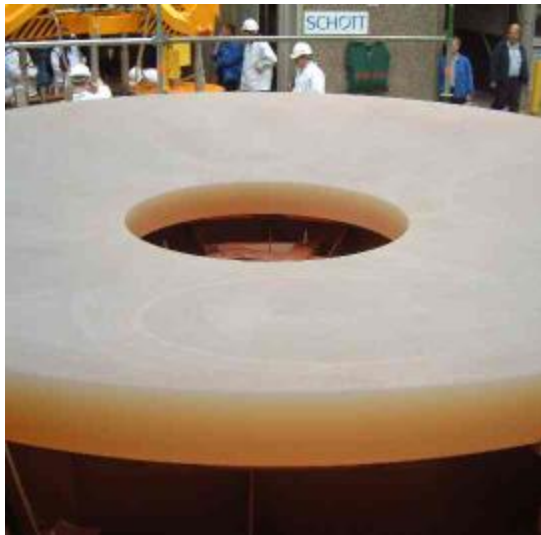


- On utilise les céramiques pour les miroirs et autre éléments optiques nécessitant une très grande stabilité dimensionnelle, lors de grandes variations de température par exemple. Cette stabilité est obtenue, car les coefficients de dilatation des microcristaux et de la matrice en verre sont de signes 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.
- Par exemple, le **Zerodur**® de Schott qui possède un coefficient de dilatation extrêmement bas:

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



- Les miroirs monolithiques (jusqu'à 8 m de diamètre) des grands télescopes sont fabriqués en Zerodur.



Cristaux optiques

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 sont:

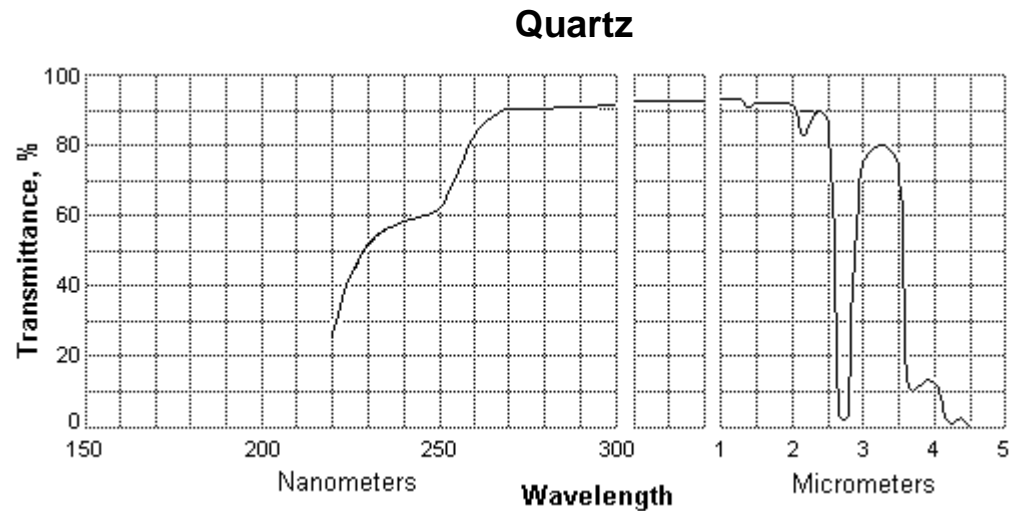
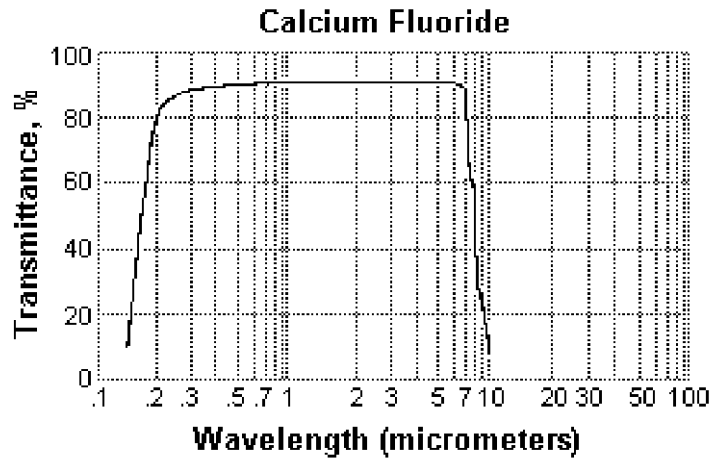
- Excellent facteur de transmission dans des plages spectrales étendues.
- Excellente relation indice de réfraction - dispersion.
- Haute résistance mécanique.
- Résistance aux chocs thermiques

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 $(Y_3Al_5O_{12}+Nd)$.

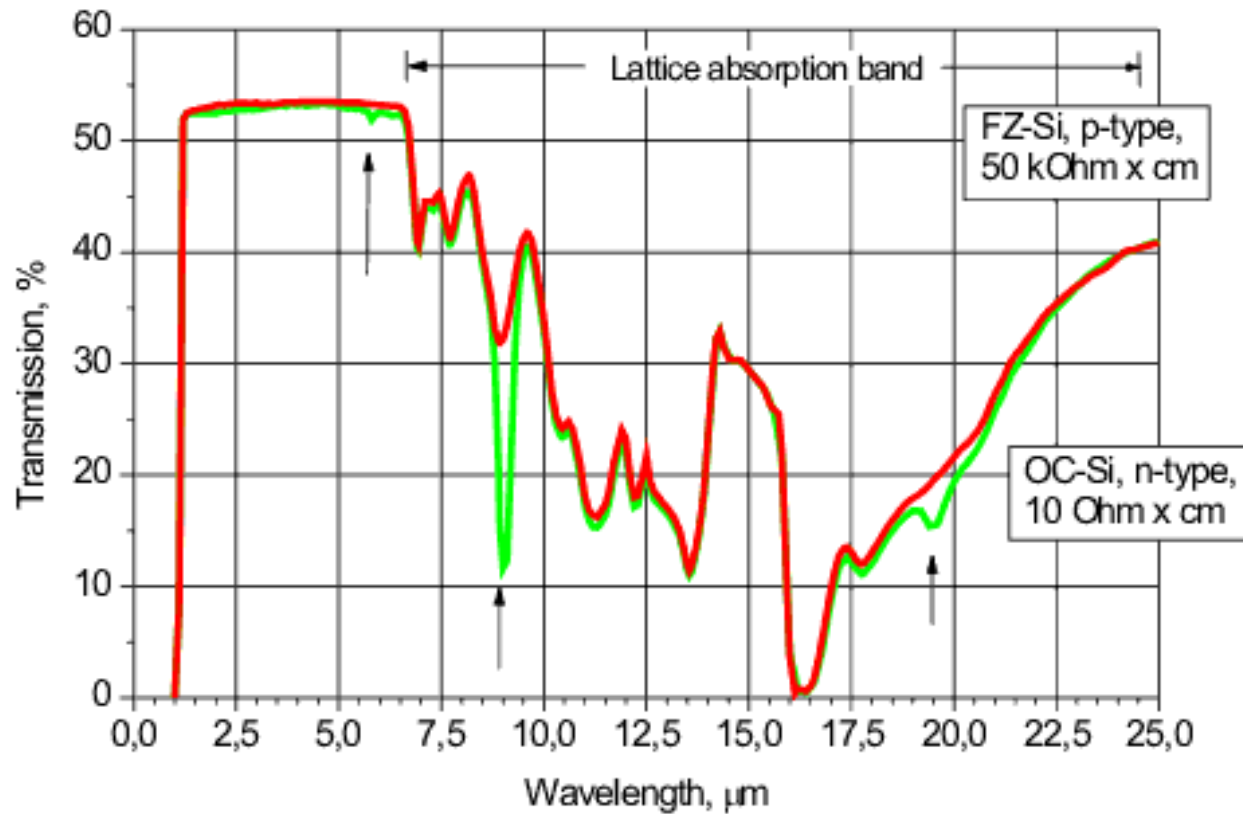
Les cristaux sont également utilisés pour leurs propriétés de biréfringence.

Cristaux – transmission



Transmission su silicium

(opaquo dans le visible, transparent dans l'infrarouge)



Travail personnel

- Chapitre 1. Matériaux optiques du polycopié *Technologies optiques*

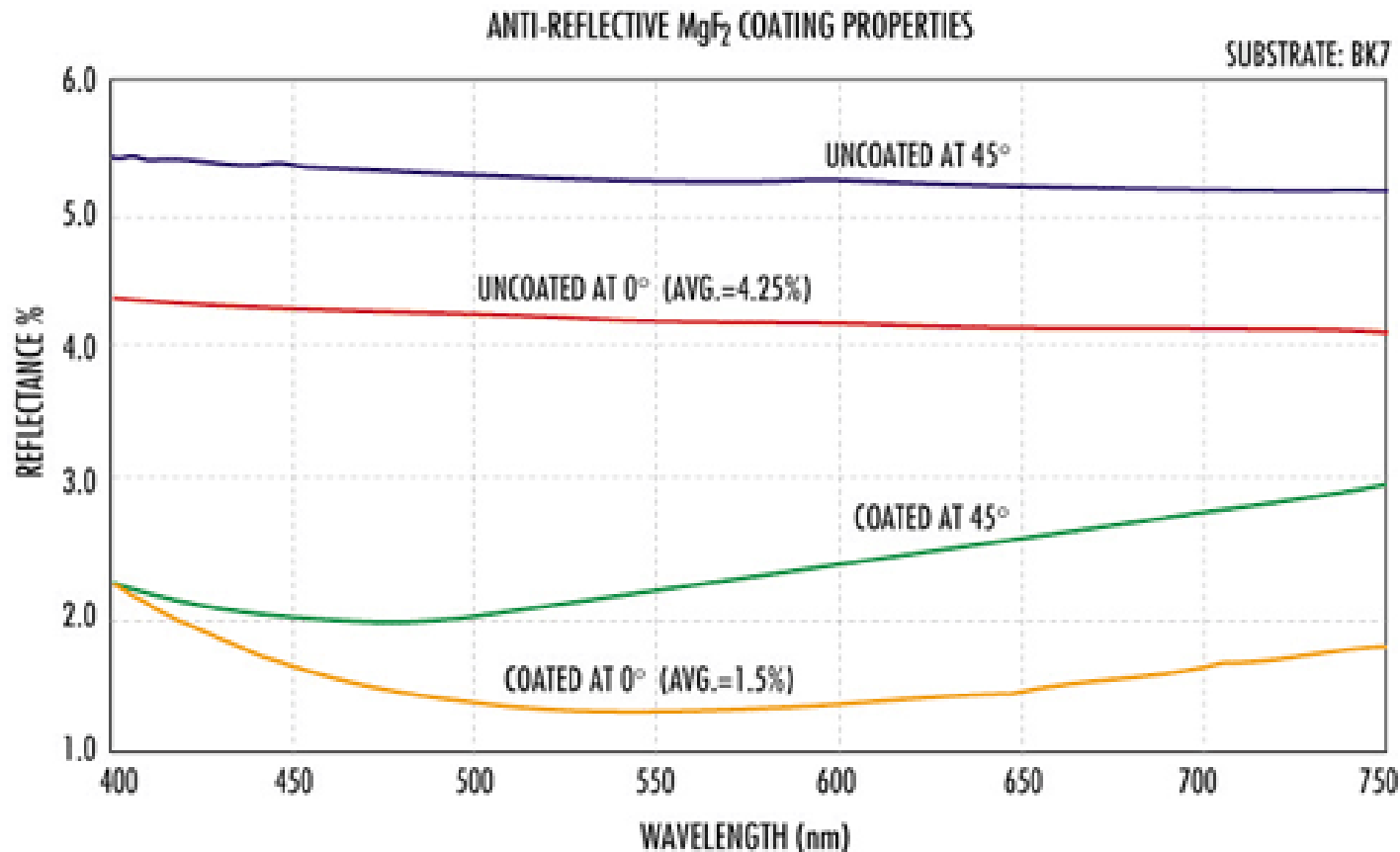
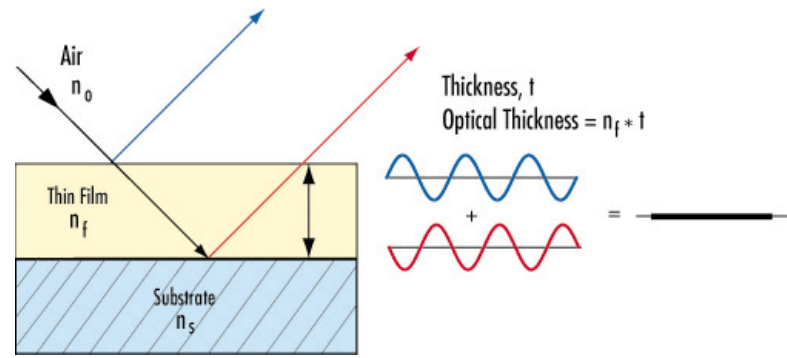
Lire et noter d'éventuelles questions.



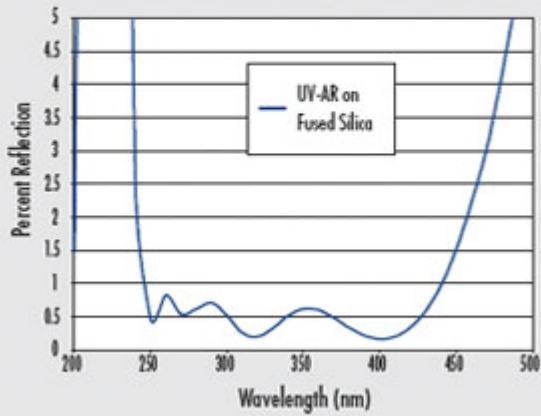


Les traitements antireflets

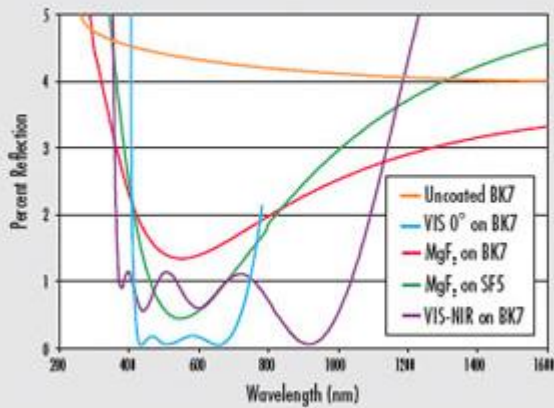
Performance des traitement antireflets



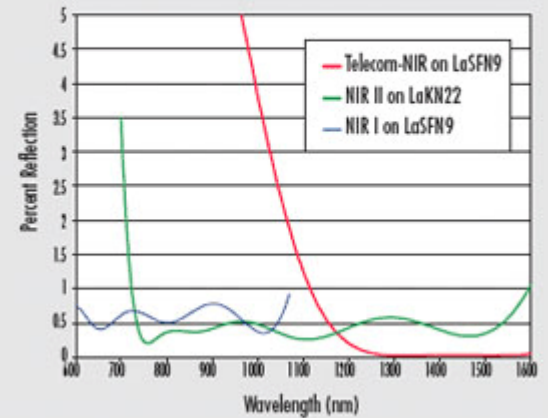
AR COATING FOR THE ULTRAVIOLET

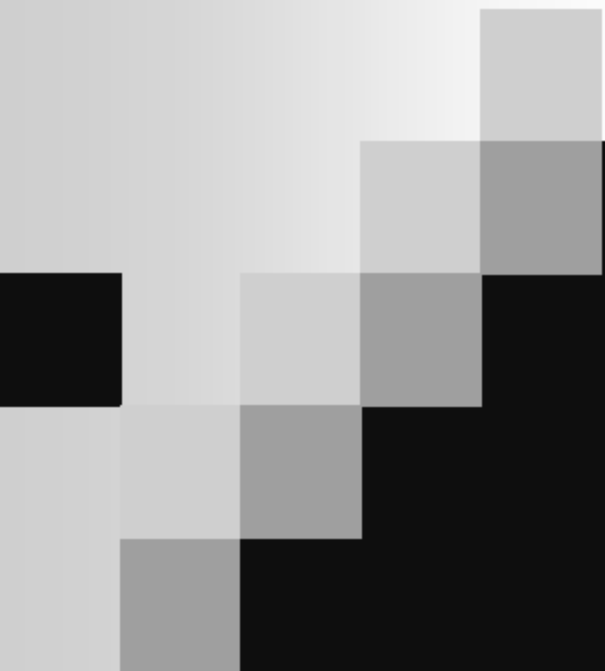


AR COATINGS FOR THE VISIBLE



AR COATINGS FOR THE NEAR-INFRARED

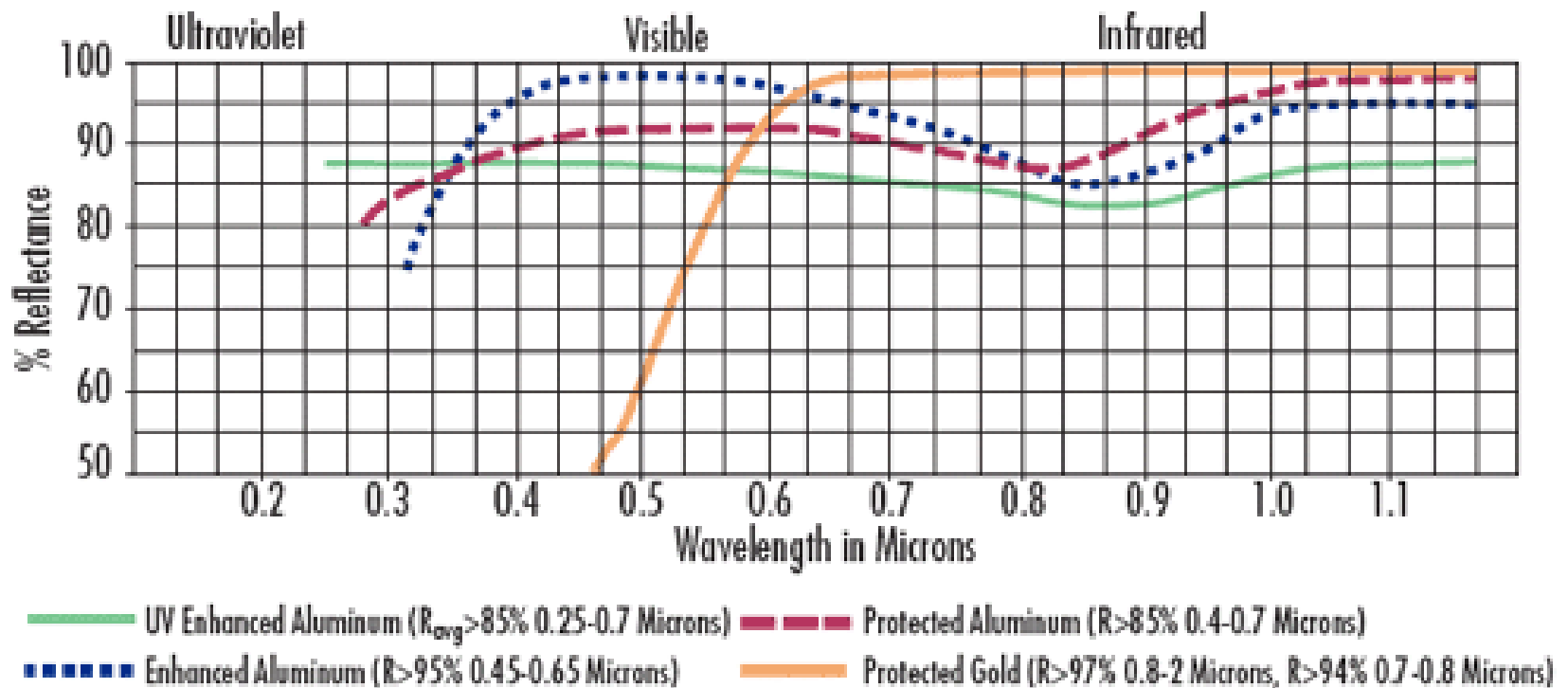




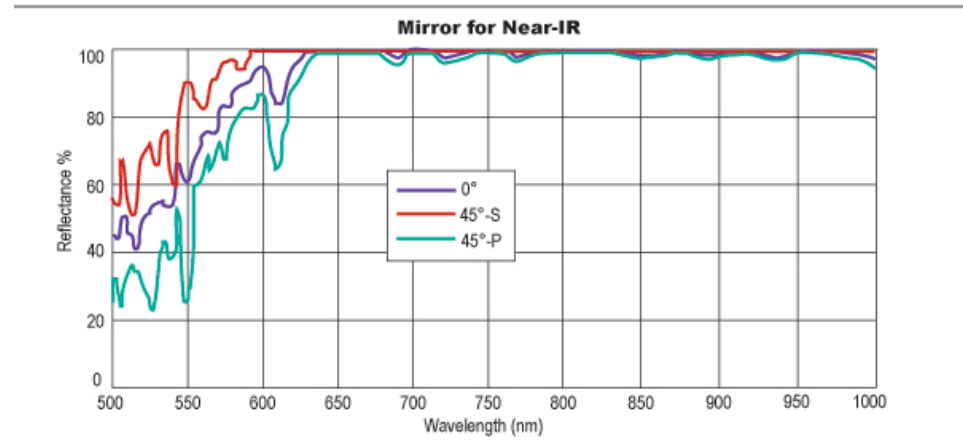
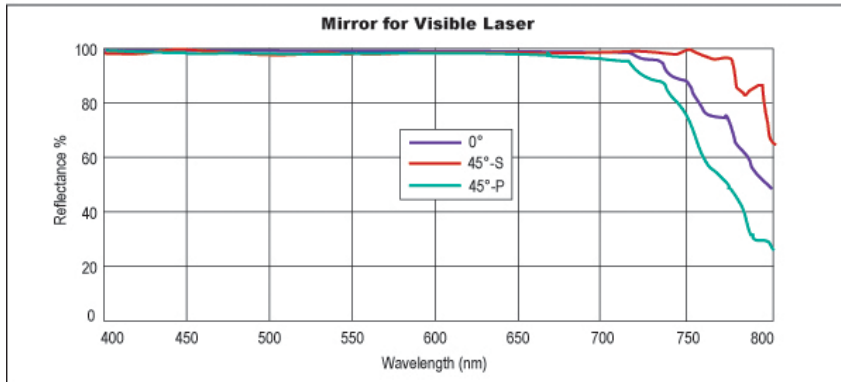
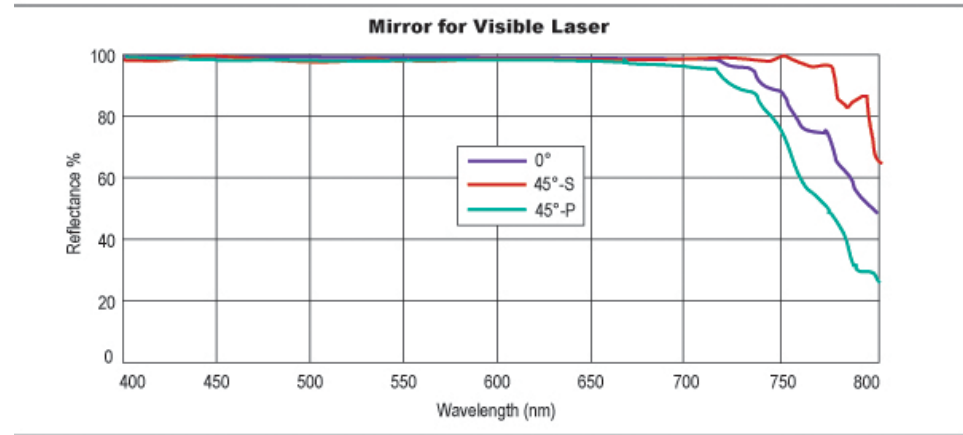
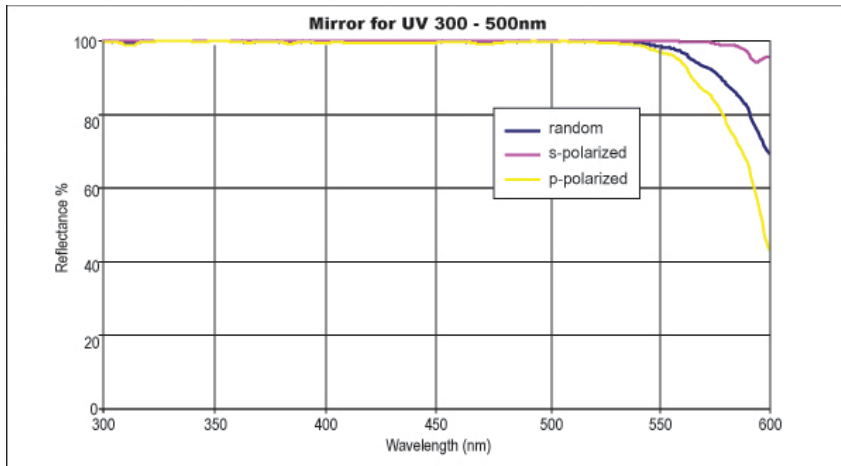
Miroirs et autres composants pour la reflexion

Aluminure des miroirs

Reflectance Curves for Metallic (Mirror) Coatings



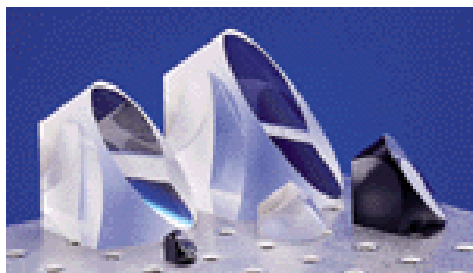
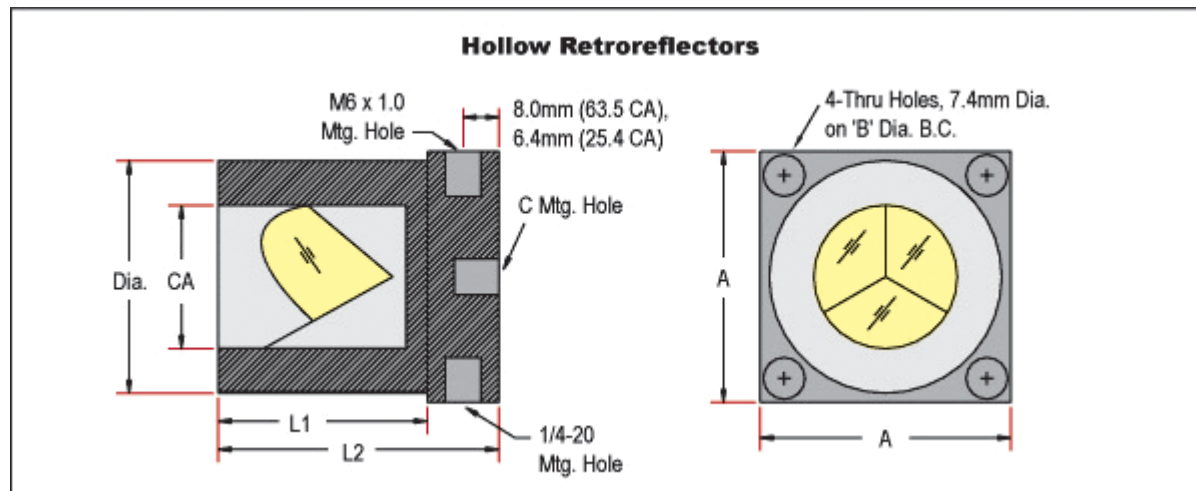
Miroirs pour laser – courbes de réflexion



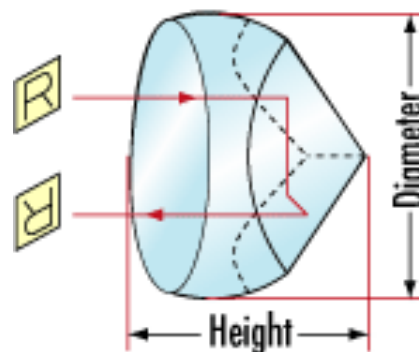
Rétroreflecteurs – coins de cube (*corner cubes*)



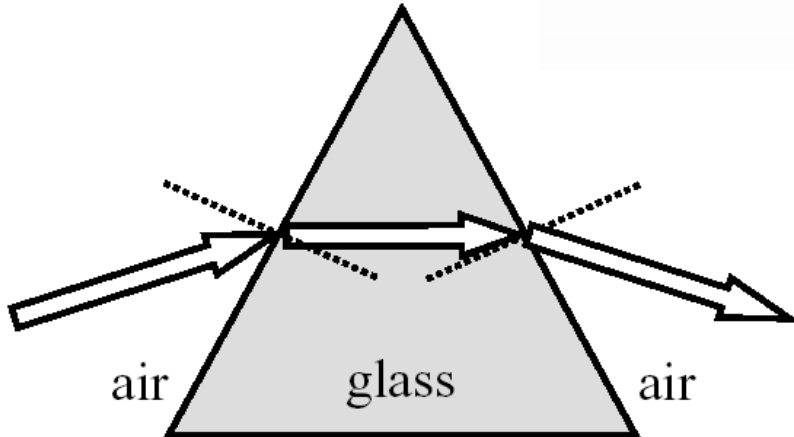
Composites



Monolithiques

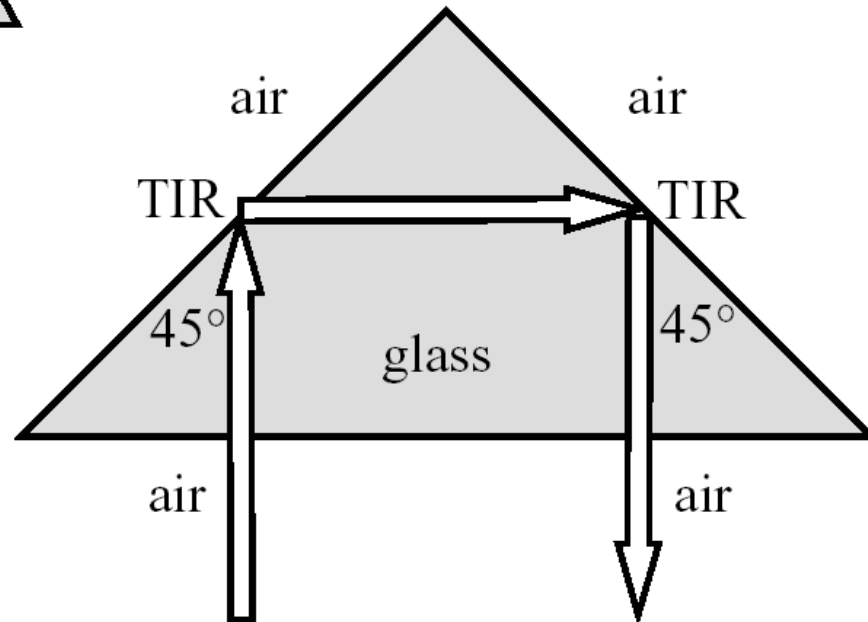


Prismes



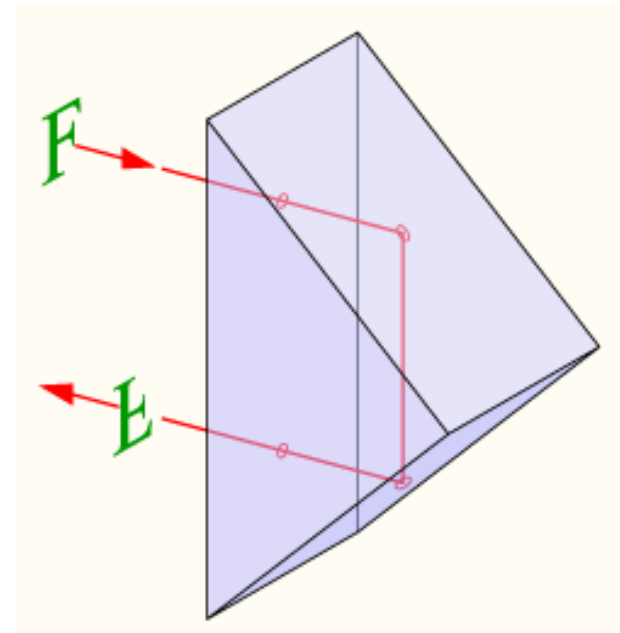
- Prismes dispersifs

- Prismes réflecteurs



Prisme de Porro

- Inverse l'image en préservant le sens gauche-droite

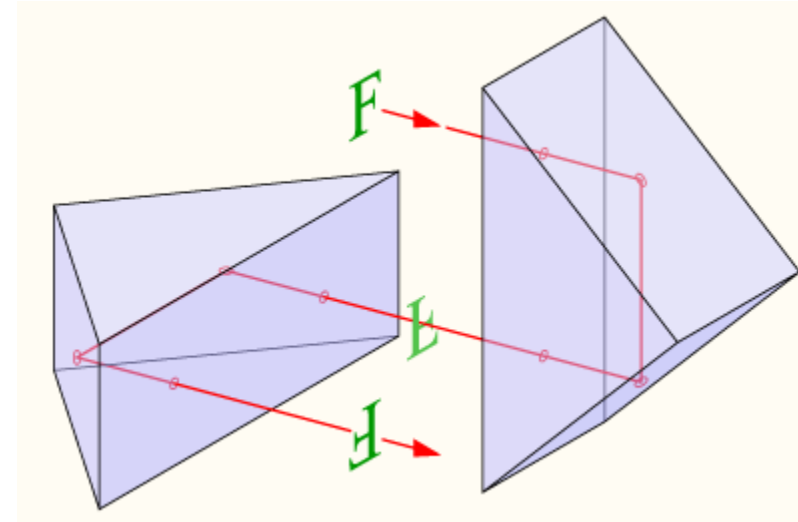


2 prismes de Porro font un redresseur

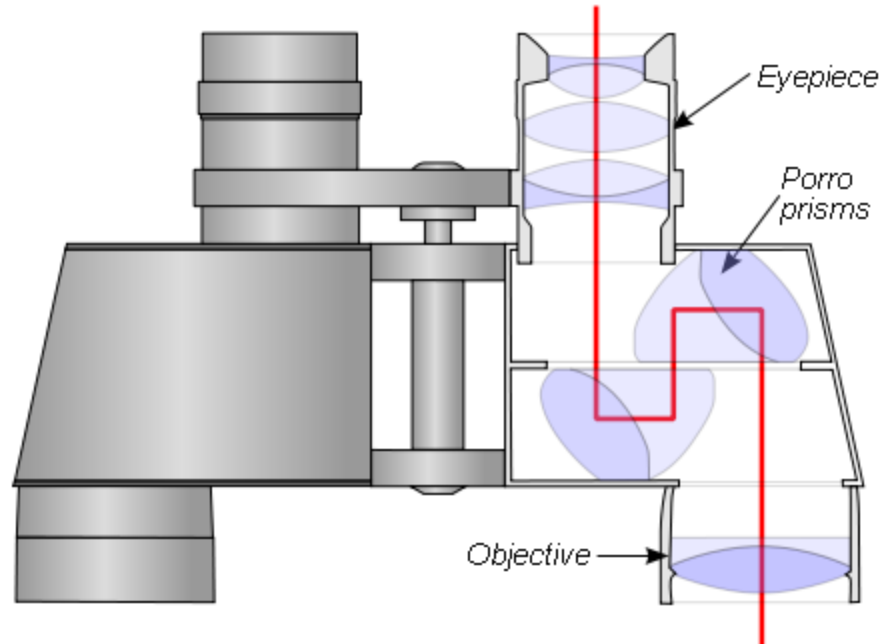
L'inconvénient des instruments d'optique fondés sur la réfraction de la lumière est que l'image est ordinairement inversée (le haut de l' **objet** se retrouve en bas de l' **image**).

L'interposition d'un redresseur permet de former une image de même position que l'objet.

Les systèmes redresseurs sont constitués à partir d'un ou plusieurs prismes et sont fondés sur le principe de la [réflexion totale](#).

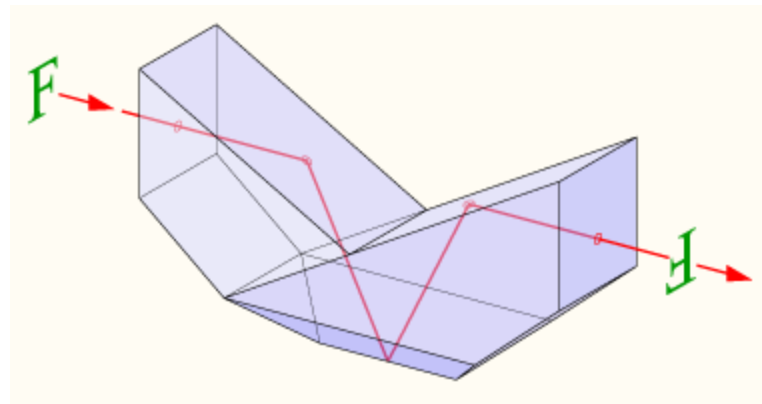


Jumelles



Le double prisme permet d'avoir une longue distance entre l'oculaire et l'objectif.

Prisme de Abbe-Koenig



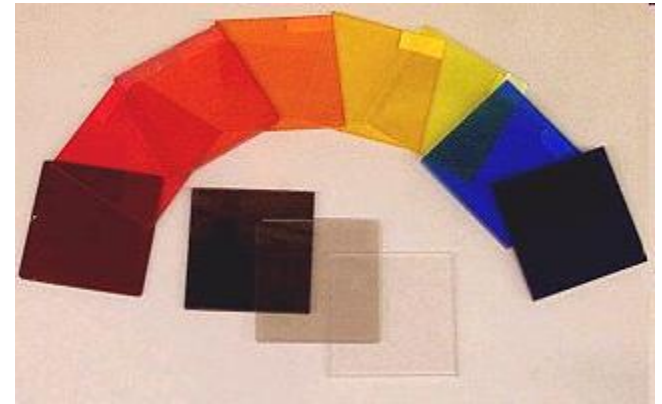


Filtres

Les filtres

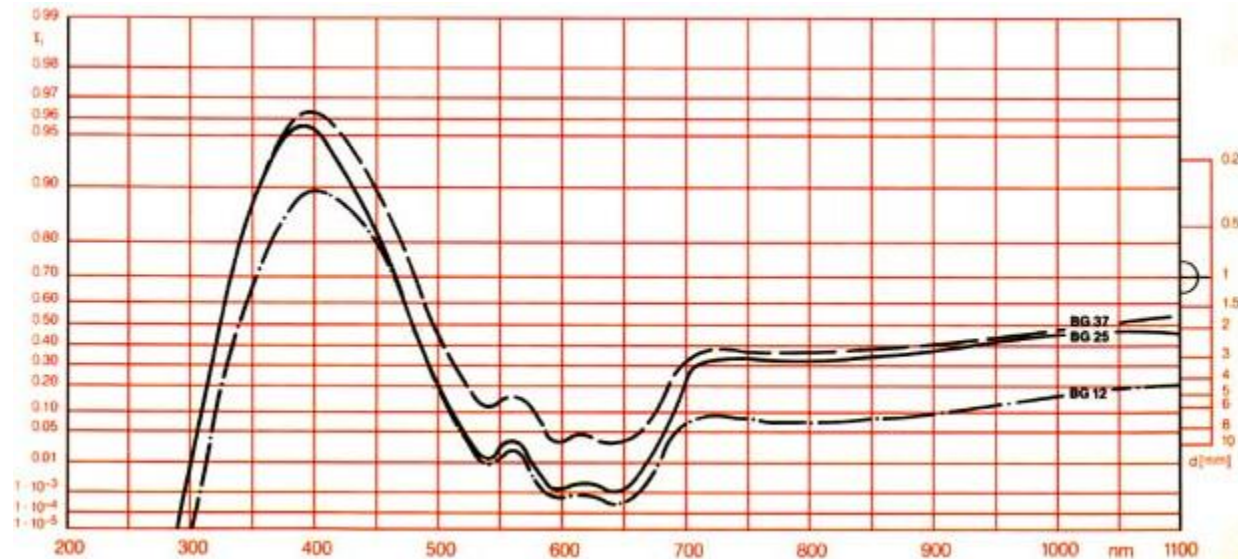
- Différents types de filtres permettent de réduire l'intensité de chaque couleur :
- Les **filtres par absorption** sont souvent fait de verres auxquels des composés organiques ou inorganiques ont été ajoutés. Il est également possible de remplacer le verre par du plastique afin de créer un gel coloré plus clair et moins cher qu'un verre coloré.
- Les **filtres par réflexion** sont obtenus en recouvrant leur surface avec différentes substances. Cette couche pouvant être contrôlée précisément, on utilise souvent ces filtres pour des instruments de haute précision. Ils sont cependant plus cher et plus fragiles que les filtres par absorption.
- Ces filtres peuvent être caractérisés par leur transmittance T (fraction de l'intensité lumineuse qui passe) en fonction de la longueur d'onde.
- Cette transmittance est analogue à la fonction de transfert en électricité. On peut aussi utiliser la notion d'absorbance $A = -\log(T)$.

Les filtres par absorption (verres colorés)



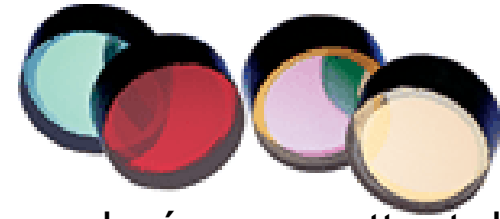
- Ce type de verre présente une bande passante en longueur d'onde large (centaines de nanomètres). Ce ne sont donc pas des filtres sélectifs dans le sens qu'ils laissent passer un grand nombre de différentes couleurs.
- Étant des **filtres par absorption**, leur couleur est due au différents composés contenus dans le verre. Ces composés sont capables d'absorber certaines longueurs d'ondes, et de les restituer autrement.
- Ainsi, la couleur est expliquée de la même manière que pour les solutions en chimie, étudiées par la spectrométrie d'absorption.
- Ces verres sont souvent utilisés en optique, par exemple, pour isoler une raie lumineuse parmi d'autres.

Transmittance d'un filtre

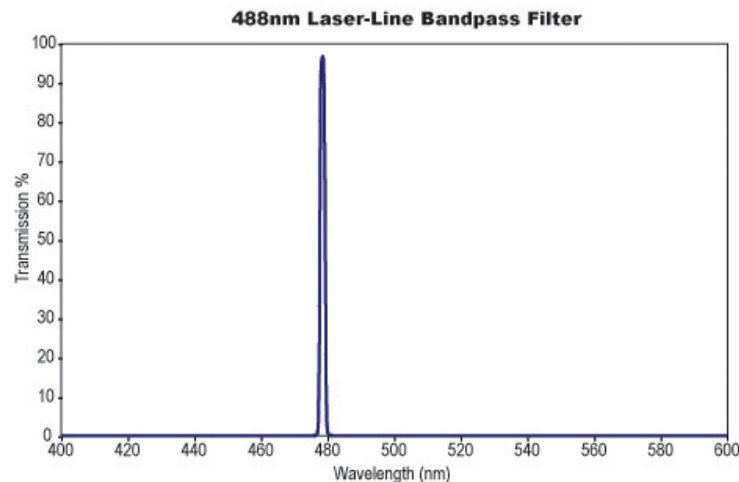


- La figure ci-contre présente un exemple de transmittance d'un verre coloré.
- On remarque sur cette courbe qu'un verre coloré ne laisse pas uniquement passer les longueurs d'onde contenues dans une certaine bande passante. Il y a en réalité de nombreuses autres couleurs qui passent.

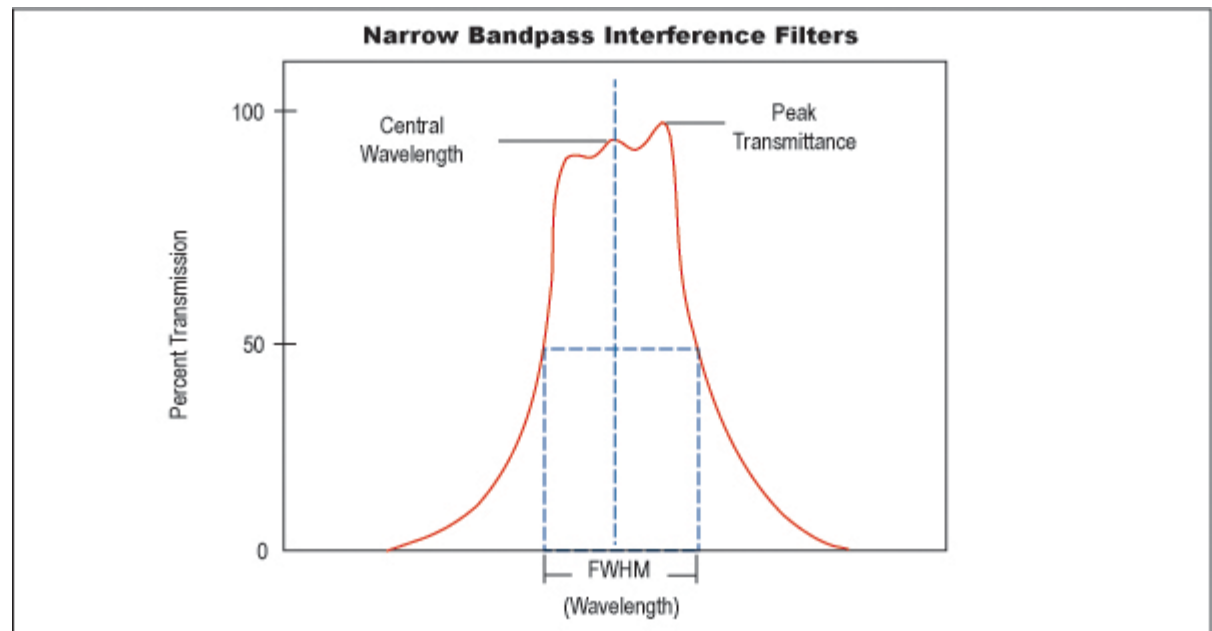
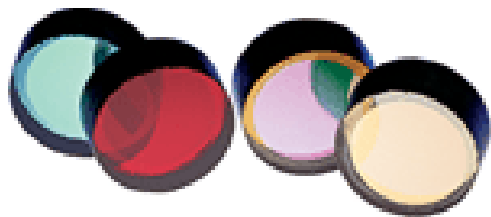
Filtres interférentiels



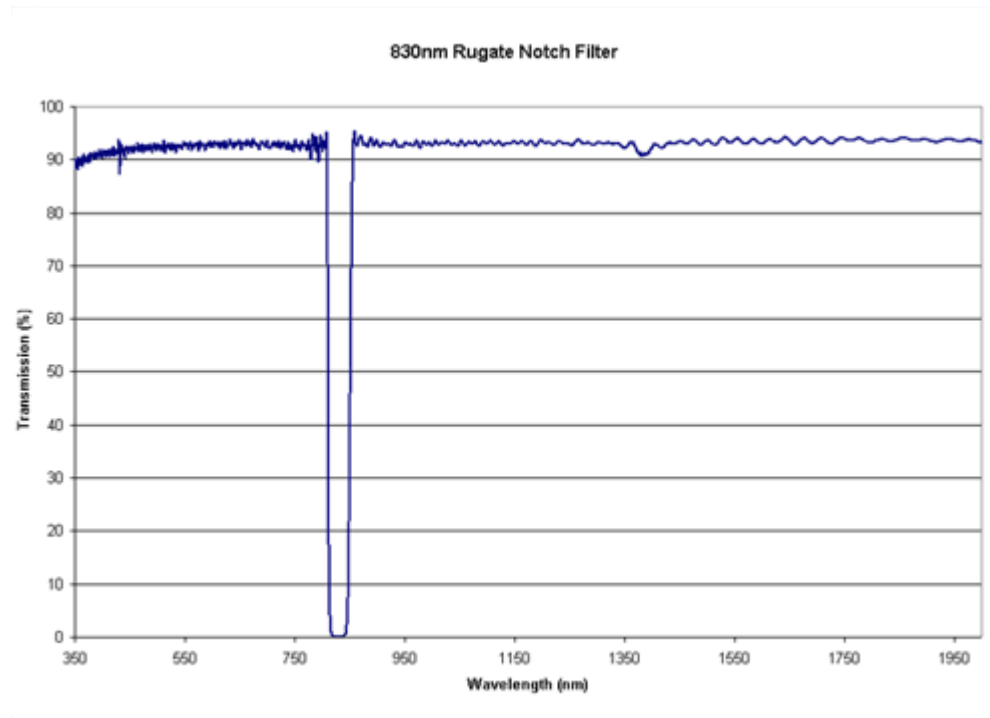
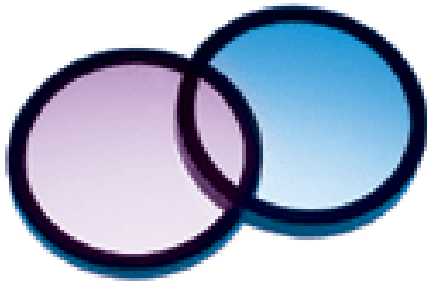
- Ces *filtres par réflexion*, contrairement aux verres colorés, permettent de sélectionner une partie du spectre lumineux beaucoup plus fine : ce sont des *filtres sélectifs*.
- Ils fonctionnent sur le principe d'une cavité Fabry-Pérot : ils sont constitués de deux lames partiellement réfléchissantes. L'onde qui s'installe entre ces deux lames ne peut être constituée que de quelques longueurs d'onde bien définies. Ainsi ces filtres permettent de réduire fortement la bande passante de la lumière utilisée.
- Ils sont souvent utilisés en optique afin de travailler en lumière quasi-monochromatique.



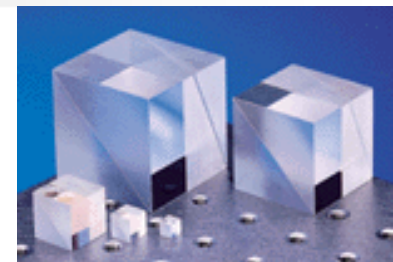
Filtres interférentiels



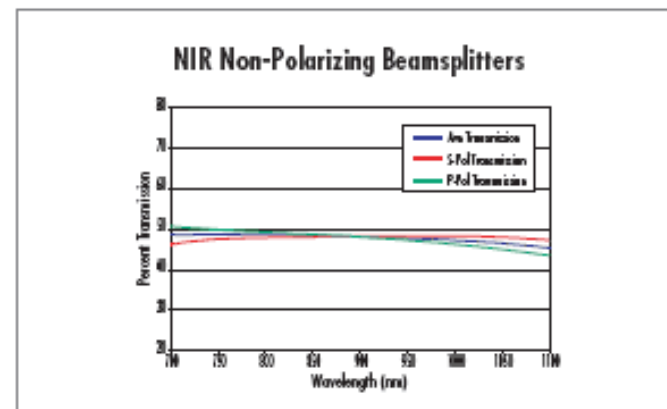
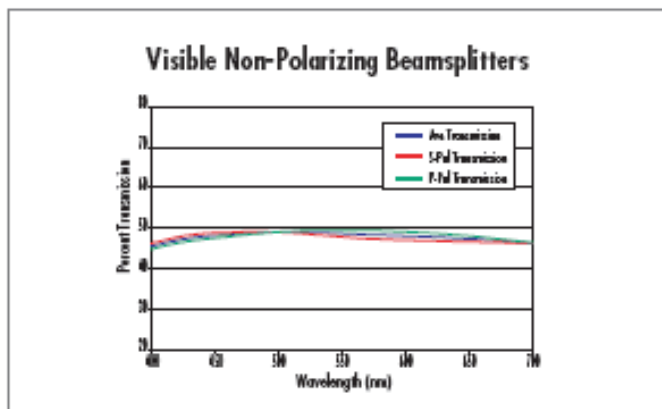
Filtres interférentiels «notch»



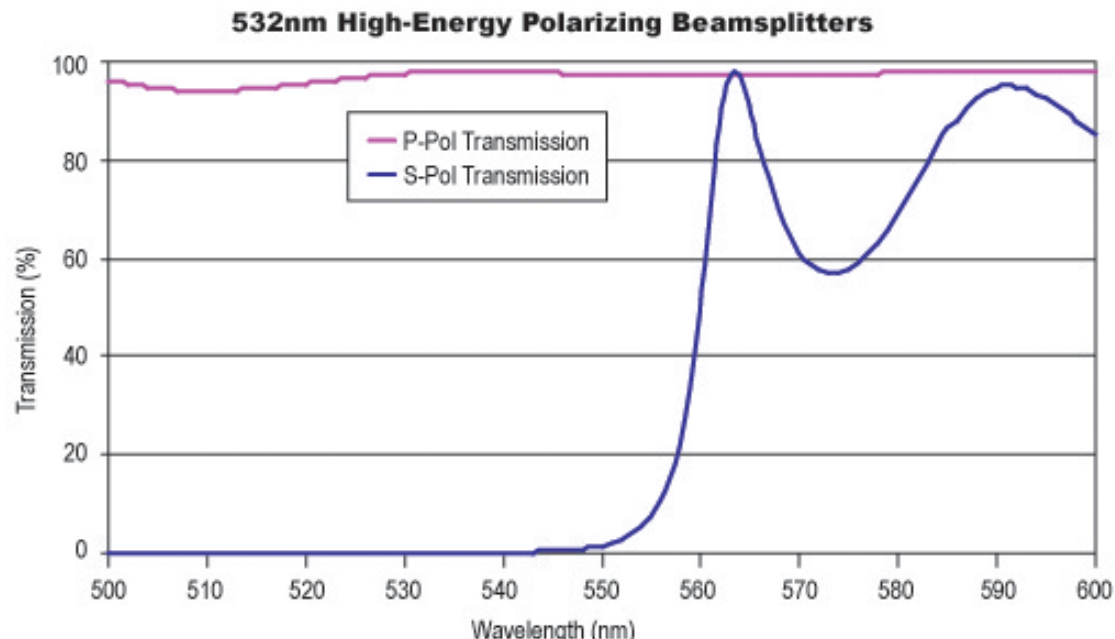
Séparateurs de faisceaux (*beam splitters*)



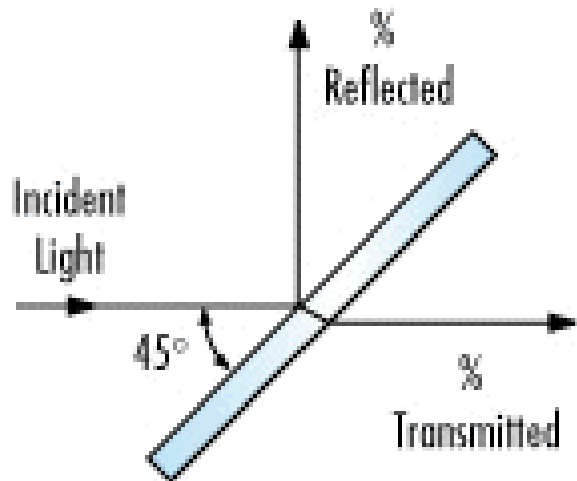
1. Non-polarisants



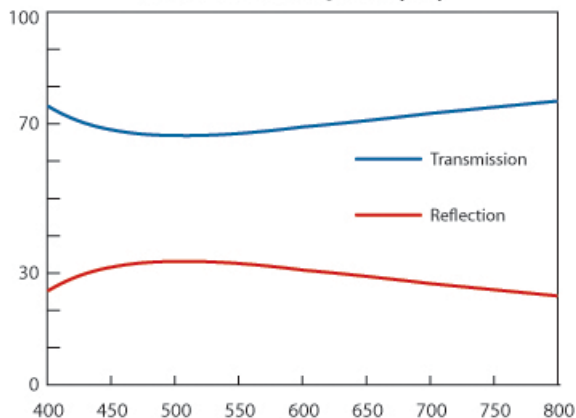
2. Polarisants



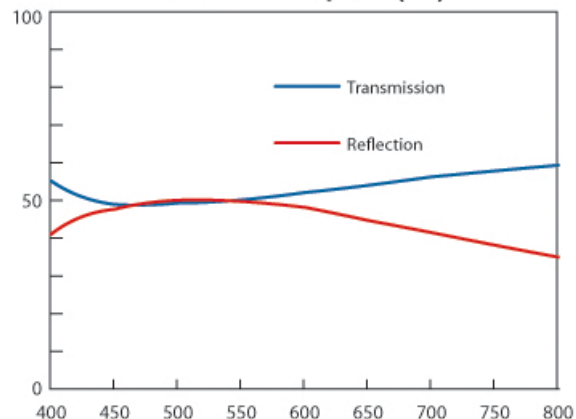
Séparateurs de faisceaux à lame



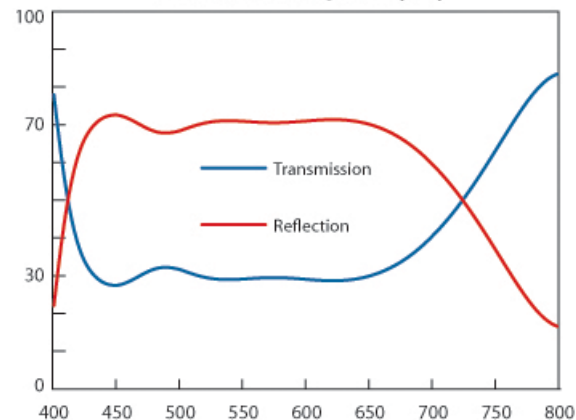
30R / 70T Beamsplitter (45°)



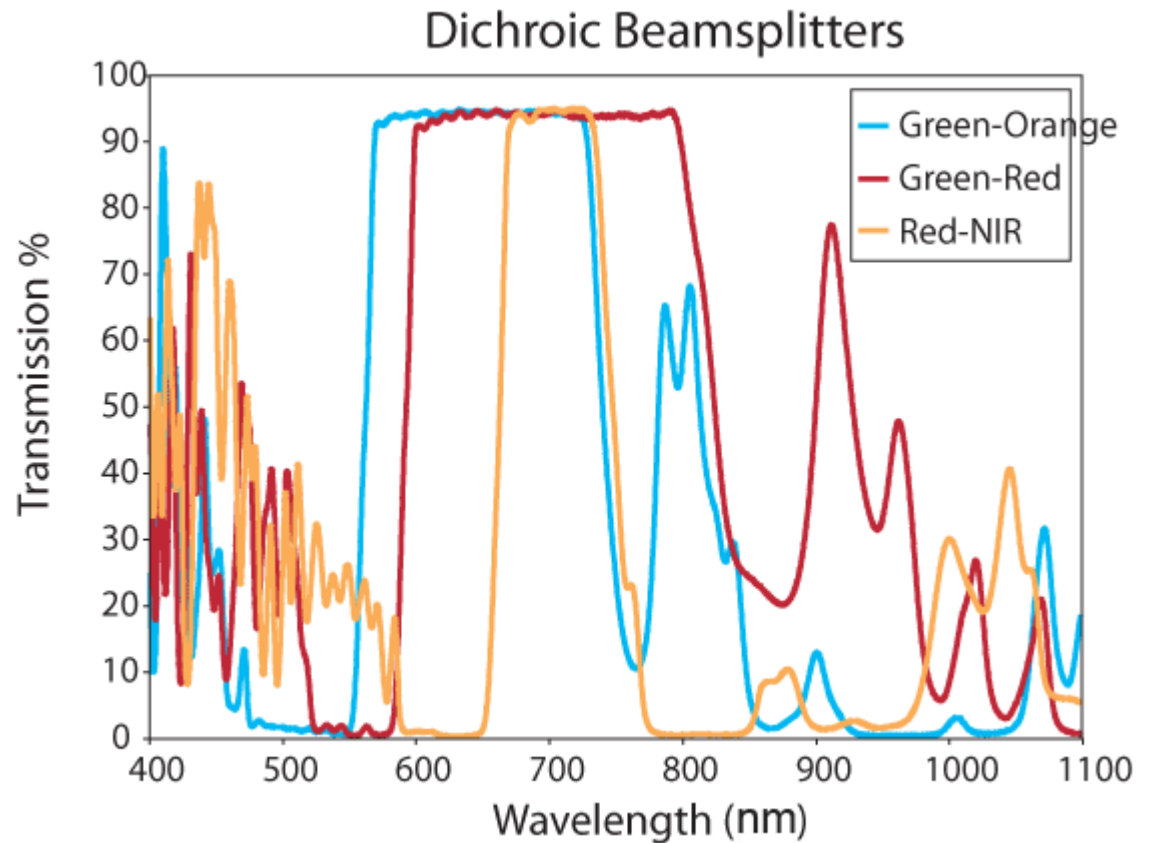
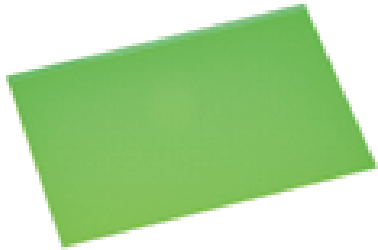
50R / 50T Beamsplitter (45°)



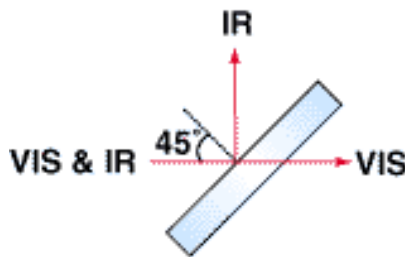
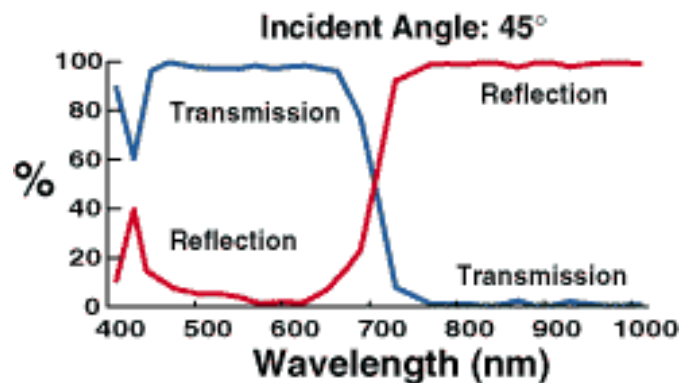
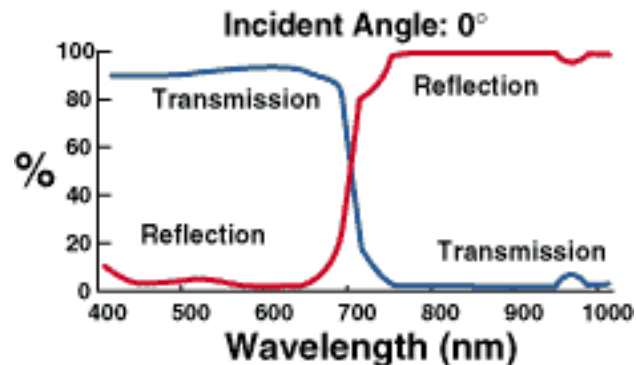
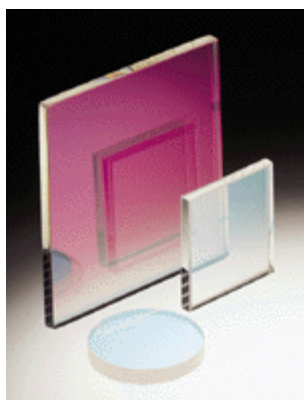
70R / 30T Beamsplitter (45°)



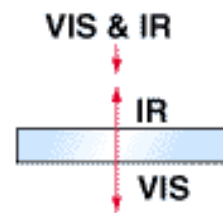
Beam-splitters dichroïques



Miroirs spéciaux (*dichroïques*): ex. *Hot Mirror*: transmission VIS, réflexion IR



Angle of Incidence



Angle of Incidence

Miroirs spéciaux (*dichroïques*): *Cold mirror*

