

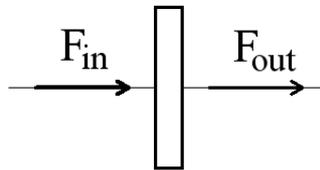
Propriétés optiques des matériaux : absorption, réflexion, réfraction, dispersion...

Les matériaux utilisés pour réaliser des composants optiques sont
 ± **absorbants** (pertes énergétiques selon le trajet Flux ↓ si L↑)
 ± **réfringents** (déviations du faisceau au franchissement d'un dioptre,...)
 ± **réfléchissants** (pertes au franchissement d'un dioptre, images multiples...)
 ± **dispersifs** (trajet différents selon la couleur λ , ...)

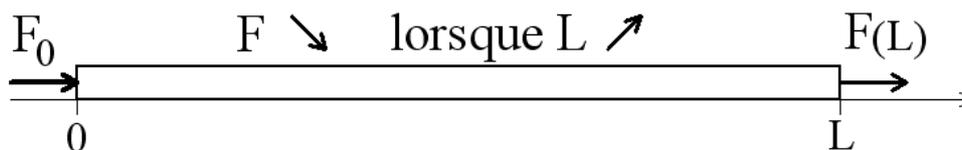
1- Absorption de lumière par le milieu de propagation

Filtres atténuateurs neutre

- Composant utilisé pour faire diminuer le flux $F \downarrow$
- Atténuation $A = \frac{F_{out}}{F_{in}}$
ex : si $A = 0,1$ seul 10% du flux passe le filtre
- A facteur de perte par absorption $0 \leq A \leq 1$
matériau : opaque $A = 0$, transparent $A \approx 1$
- Selon le modèle : A fixé ou réglable (orientation)



Absorption : loi de Beer $F(L) = F_0 \exp(-\alpha(\lambda)L)$



Le flux de lumière traversant un cylindre de section constante décroît exponentiellement lorsque sa longueur L augmente avec $\alpha(\lambda)$ coefficient d'absorption (en m^{-1}) caractéristique du milieu de propagation.

Atténuation A selon l'épaisseur (sans unité) $A = \frac{F(L)}{F_0} = \exp(-\alpha(\lambda)L)$

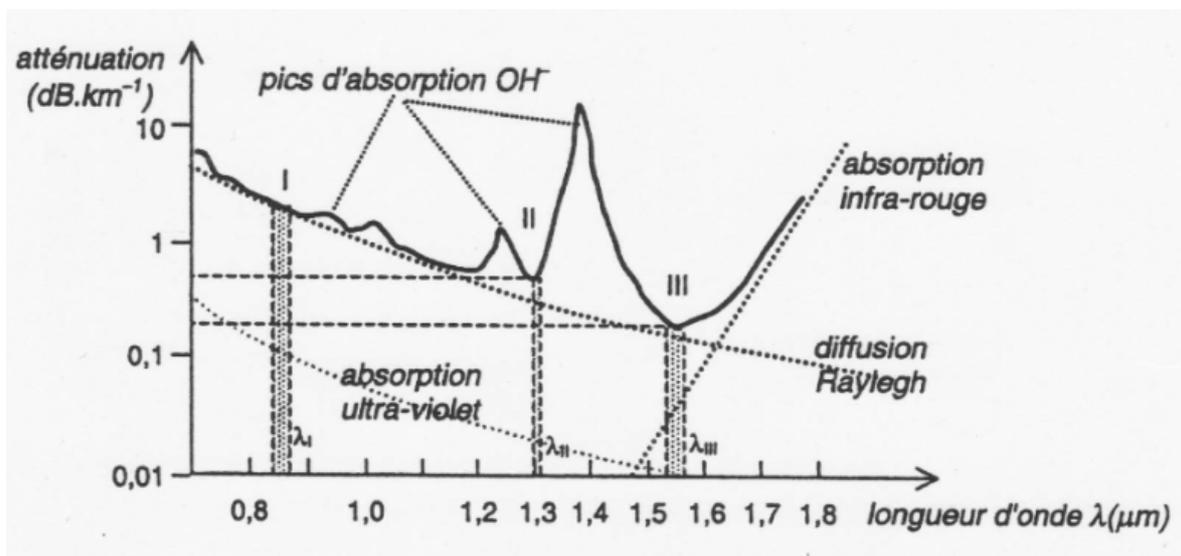
Atténuation A_{dB} (en dB) $A_{dB} = -10 \log_{10}(A) = -10 \log_{10}\left(\frac{F(L)}{F_0}\right)$

Une échelle logarithmique facilite l'usage des nombres très petits

$$A_{dB} = -10 \log_{10}(\exp(-\alpha(\lambda)L)) = -10 \frac{\ln(\exp(-\alpha(\lambda)L))}{\ln(10)} = \frac{10}{\ln(10)} \times \alpha(\lambda)L$$

- $A_{dB.m^{-1}} = \frac{A_{dB}}{L} = \frac{10}{\ln(10)} \times \alpha(\lambda) = 4.34 \alpha(\lambda)$ atténuation linéique en $dB.m^{-1}$
- $A_{dB} = A_{dB.m^{-1}} \times L$ et $A = 10^{-\frac{A_{dB}}{10}}$
- Il est facile de confondre A , A_{dB} et $A_{dB.m^{-1}}$...

Exemples : fibre optique « silice » (verre) dans l'IR, lentilles dans le visible



Atténuation linéique pour le verre de fibre optique

Le **minimum d'atténuation** du verre est dans l'IR

$$A_{dB.km^{-1}}(\lambda_{III} = 1,55 \mu m) \approx 0.2 \text{ dB.km}^{-1}$$

Il reste 10% du flux initial après 50 km.

$$\text{car } A_{dB} = 0.2 \times 50 = 10 \text{ dB et } A = 10^{-10/10} = 10^{-1} = 0.1 = 10\%$$

→ fort espacement donc baisse de coût des répéteurs (amplificateur optique) pour les réseaux fibres du téléphone et Internet.

Pour le **visible**, on extrapole $\approx 20 \text{ dB.km}^{-1}$ soit $\approx 20 \cdot 10^{-5} \approx 0.0002 \text{ dB.cm}^{-1}$.

Pour une lentille de 1 cm d'épaisseur, on a $A \approx 10^{-0.0002/10} \approx 0.999954$ Négligeable !

Remarque : pour le verre de silice, il y a plusieurs causes d'atténuation (cf. Cours de Matériaux)

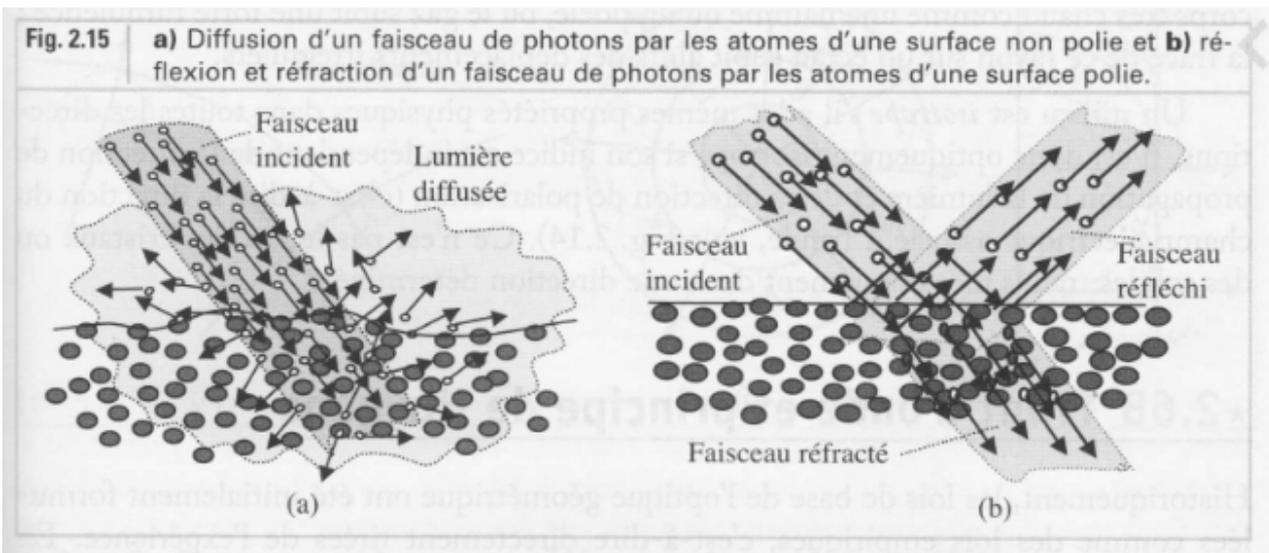
- **Absorption dans le matériau** : pour la silice il y a deux bandes d'absorption : dans l'IR moyen (vibrations moléculaires) et dans l'UV (transitions électroniques et moléculaires)
- **Diffusion Rayleigh**, causée par le désordre des molécules dans le matériau amorphe : variant en λ^{-4} , ce phénomène est responsable de la forte atténuation aux basses longueurs d'onde.
- **Absorption intrinsèque**, sous forme de pics, due aux ions OH^- ou à des impuretés métalliques (éviter le contact des fibres avec l'eau)

2- Réflexion de la lumière

La lumière est renvoyée en arrière par une **surface réfléchissante**.

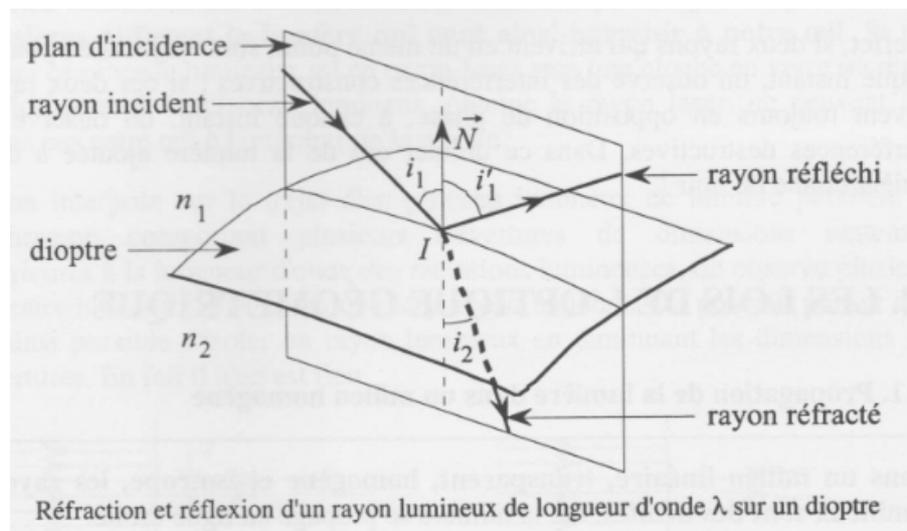
Selon la qualité du **poli** de la surface :

- **Réflexion diffuse** de l'éclairage ambiant (dans toutes les directions) : ici, la porte rouge
- **Réflexion spéculaire** dans une direction donnée : ici, le reflet du flash
 - **Réflexion métallique** : miroir « argenté », surface métallique polie, etc.
 - **Réflexion vitreuse** : interface de verre, de plastique, d'eau, etc.





quel type de réflexion ?



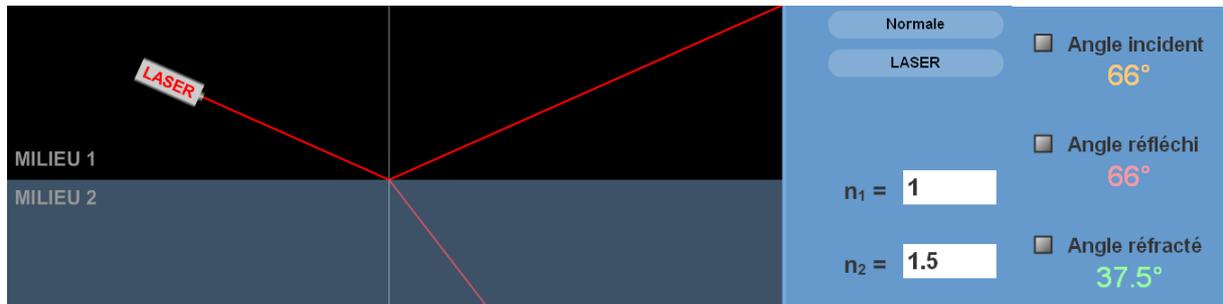
A l'interface de milieux transparents (**dioptre**), on observe :

- **Rayons coplanaires** : les rayons restent tous dans le plan d'incidence.
- **Achromatisme** : indépendant en général de la couleur (sauf rare exception comme l'or Au).
- **Symétrie** $i_1 = i'_1$ (en valeur absolue) : Le rayon réfléchi est symétrique du rayon incident par rapport à la **normale**.

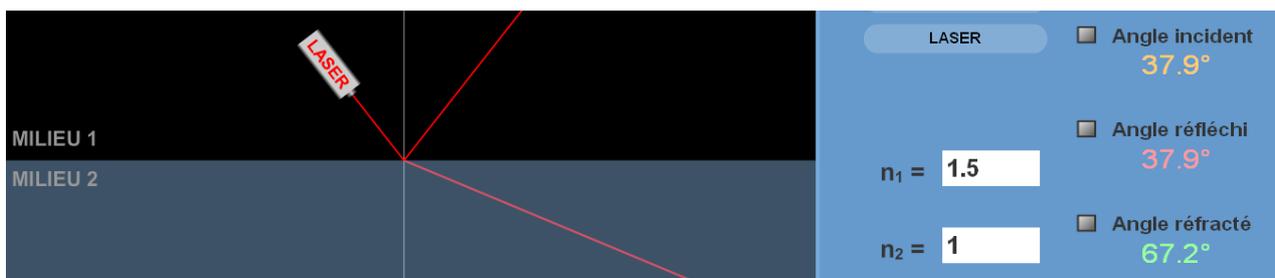
Remarques : ces lois sont dites de **Snell** (découverte 1621) & **Descartes** (publication 1637) pour la réflexion et la réfraction.

3- Réfraction lors d'un changement de milieu

- **Rayons coplanaires** : les rayons restent tous dans le plan d'incidence.
- **Chromatisme** : dépend des indices « de réfraction » $n(\lambda)$ donc de λ .
- **Asymétrie** $n_1 \sin(i_1) = n_2 \sin(i_2)$ (angle en valeur absolue) : le rayon réfracté n'est pas symétrique du rayon incident.



Pour un rayon allant vers le milieu le plus réfringent : $n_2 > n_1 \rightarrow i_2 < i_1$



Pour un rayon sortant du milieu le plus réfringent : $n_2 < n_1 \rightarrow i_2 > i_1$

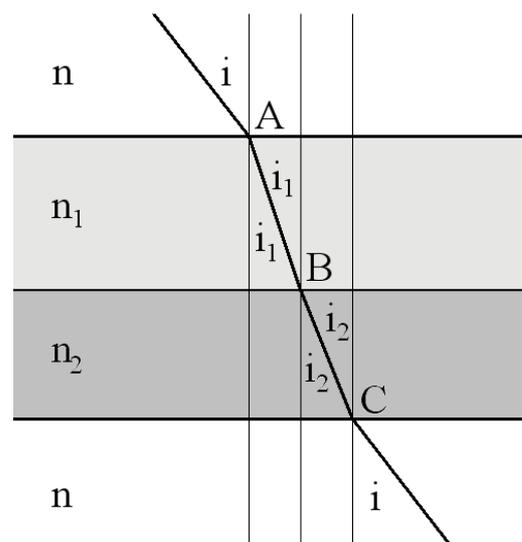
Ex : empilement de lames à faces parallèles

En entrée, angle d'incidence i

- en A $n \sin i = n_1 \sin i_1$
- en B $n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$
- en C $n_2 \sin i_2 = n \sin i'$

Même milieu d'entrée et de sortie, donc même angle $i' = i$ en sortie

→ Le rayon ressort parallèle mais décalé

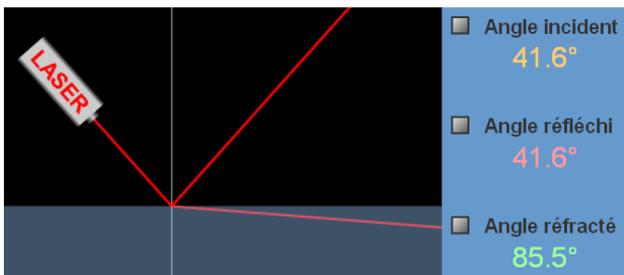


4- Phénomène de réflexion totale

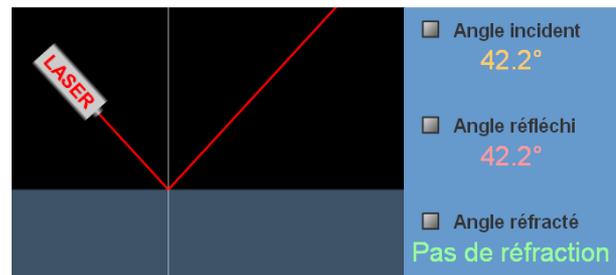
Pour un rayon sortant du milieu le plus réfringent, il existe un angle d'incidence limite au-delà duquel il y a réflexion totale

$$\sin(i_1) = \frac{n_2}{n_1} \sin(i_2) \quad \text{or } n_1 > n_2 \quad \text{et } i_{2\max} = \frac{\pi}{2} \rightarrow \sin(i_{1\text{lim}}) = \frac{n_2}{n_1} \times \sin\left(\frac{\pi}{2}\right)$$

$$n_1 > n_2 \rightarrow \sin(i_{1\text{lim}}) = \frac{n_2}{n_1}$$

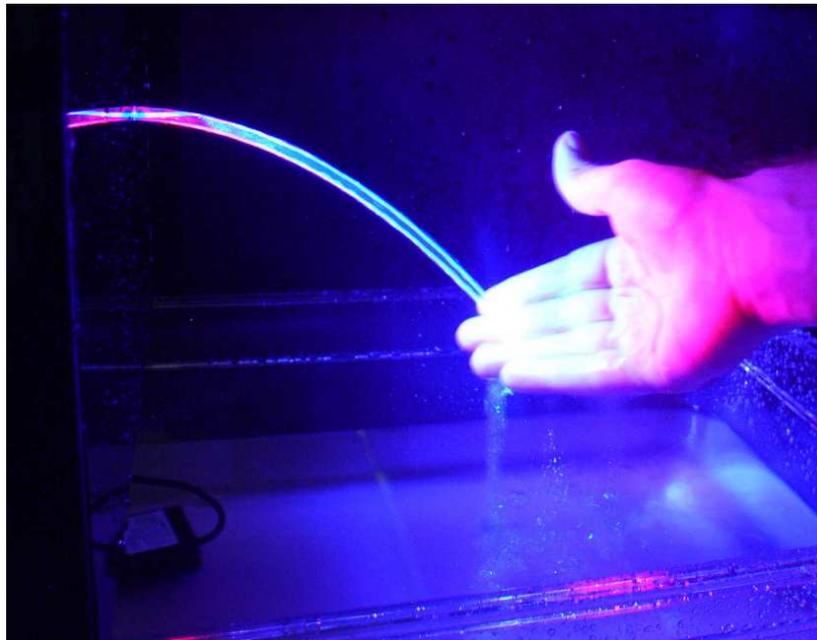


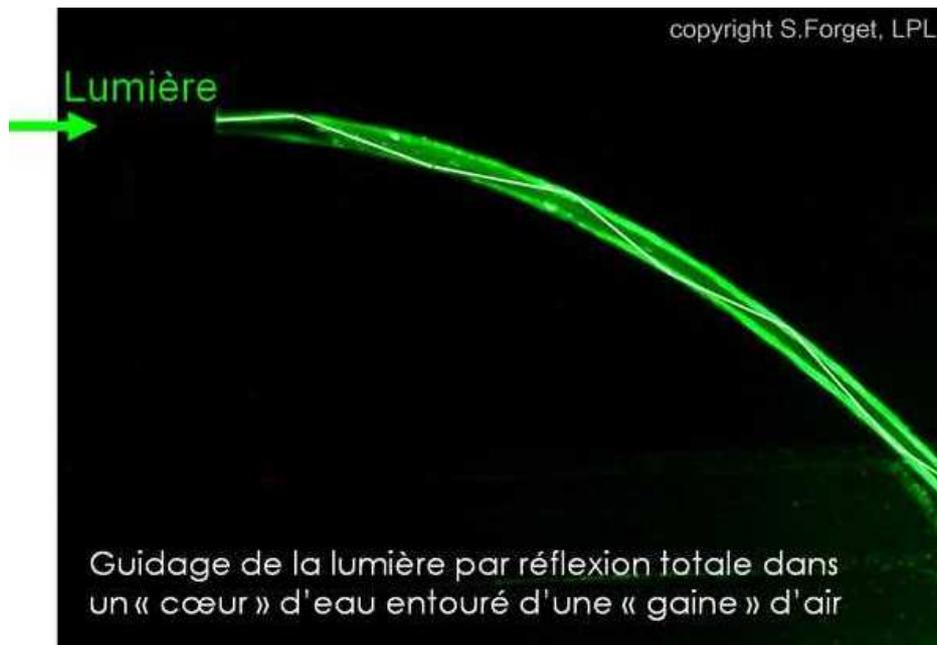
Milieu $n_1 = 1.5 \rightarrow n_2 = 1$



Angle limite $i_{\text{lim}} = \sin^{-1}(1 / 1.5) = 41.8^\circ$

Application au guidage de lumière





Principe du **guidage par fibre optique** : fontaine lumineuse à eau

Remarques :

- Sur cette photo, la lumière est diffusée par les irrégularités des parois eau / air, ce qui permet de voir la lumière qui s'échappe de la « **fibre** » d'eau.

- Angle limite de réflexion totale pour l'interface eau / air :

$$i_{\text{lim}} = \sin^{-1}(1/1.33) = 48.8^\circ$$

- Voir aussi le TD Fibre optique.

5- Aspect énergétique pour la réflexion vitreuse



Comment interpréter cette photo ?

- transmission partielle à travers la vitre de la lumière venant de l'extérieur
- Réflexion partielle sur la vitre de la lumière venant de la lampe intérieure

Bilan de puissance des flux optiques sur le dioptre (en W) : $F_{\text{incident}} = F_{\text{réfléchi}} + F_{\text{transmis}}$

La lumière initiale va de $n_1 \rightarrow n_2$

Flux optique réfléchi : $F_{\text{réfléchi}} = R F_{\text{incident}}$

avec le coefficient énergétique de réflexion R :
 $R \approx 4\%$ pour un dioptre air / verre avec $n_1 = 1$.

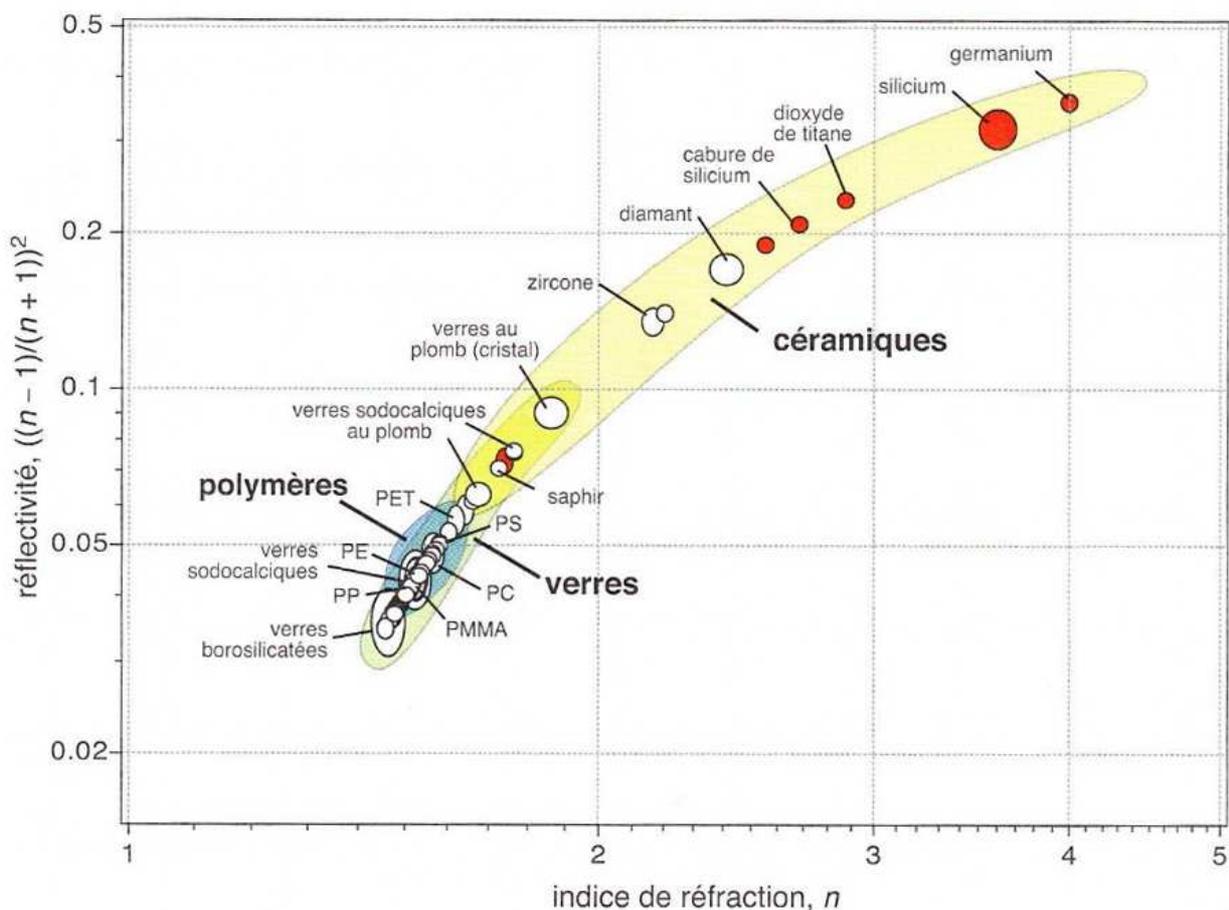
$$R \approx \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2$$

Flux optique transmis : $F_{\text{transmis}} = T F_{\text{incident}}$

avec le coefficient énergétique de réfraction T :
 $T \approx 96\%$ pour un dioptre air / verre avec $n_1 = 1$.

$$T = 1 - R \approx \left(\frac{2n_2}{n_1 + n_2} \right)^2$$

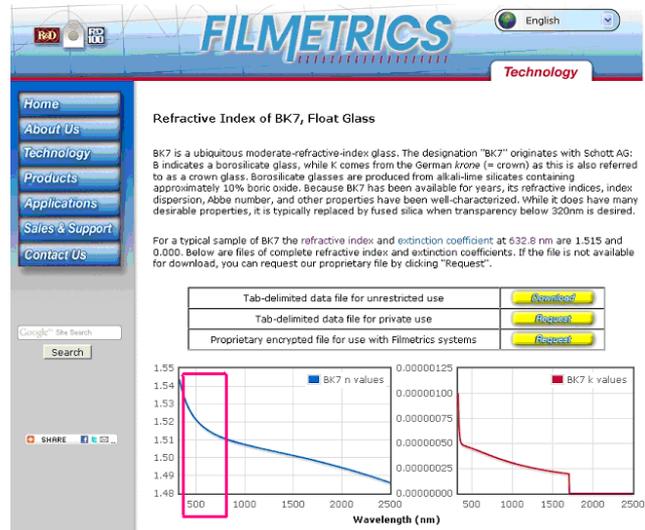
Réflexivité :



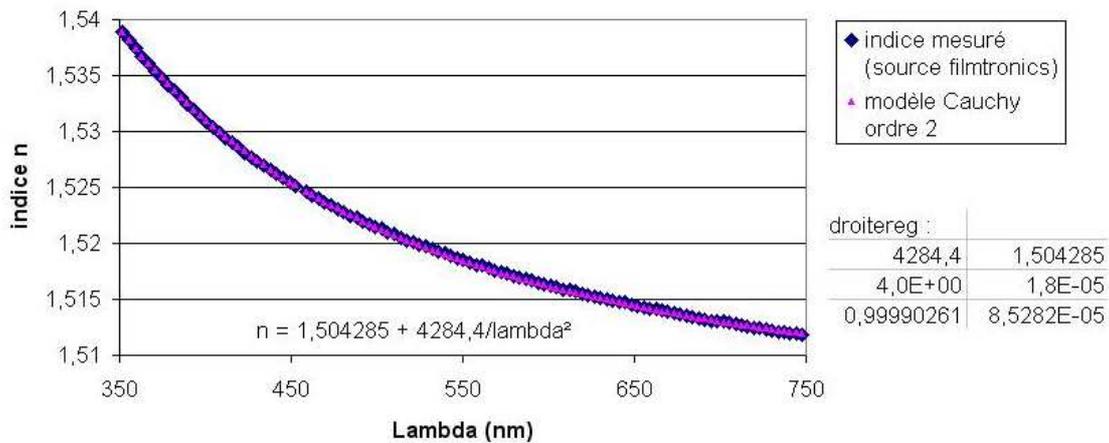
6- Indice de réfraction $n(\lambda)$ et dispersion chromatique d'un matériau transparent

Milieu	Indice
Air sec à 15°C	1,000 277
Eau à 15°C	1,333
Silice, quartz fondu	1,458
Verre en crown	1,520
Verre en flint lourd	1,650
Diamant	2,415
Silicium	3,969

Indices de réfraction pour $\lambda = 589 \text{ nm}$ (Na)



indice optique d'un verre BK7



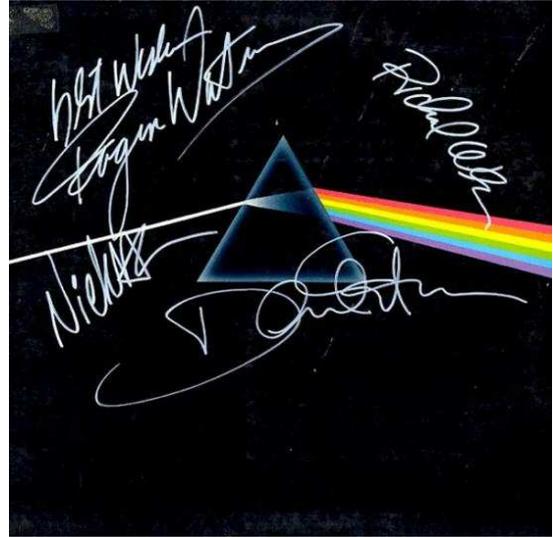
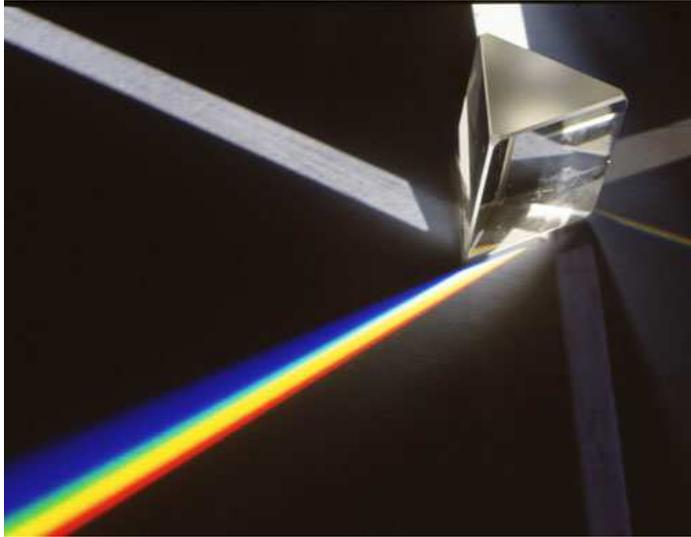
Ajustement des données expérimentales par le modèle descriptif de CAUCHY : $n(\lambda) = A + B / \lambda^2$

Caractérisation de la **dispersion chromatique** d'un verre :

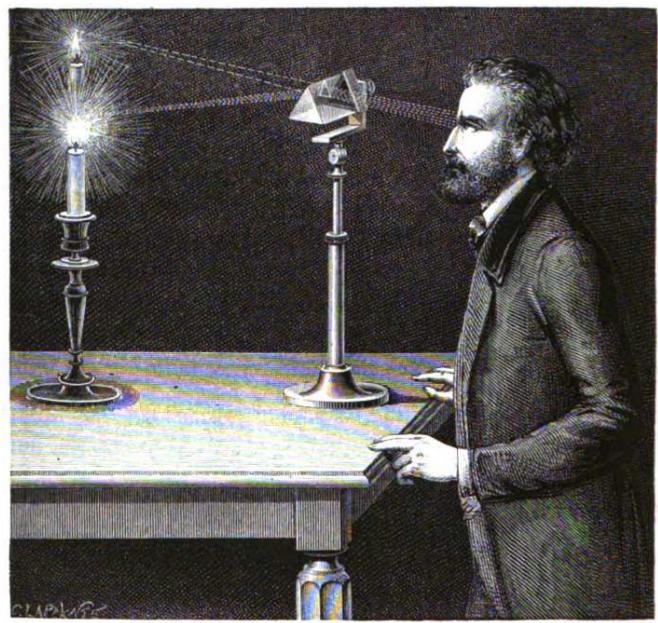
- indice $n_D \rightarrow \approx$ milieu de la bande visible (raie D du sodium $\lambda = 589,3 \text{ nm}$)
- écart $\Delta n = n_F - n_C \rightarrow$ variation sur \approx la bande visible (raies C et F de l'hydrogène rouge $\lambda = 656,3 \text{ nm}$ et bleu $\lambda = 486,1 \text{ nm}$)
- la **constringence** $V = \frac{n_D - 1}{\Delta n}$ mesure la dispersion chromatique.

$v < 50$ très dispersif (verre flint, etc.); $v > 50$ peu dispersif (verre crown, etc.)

7- Dispersion d'un faisceau de lumière par un prisme



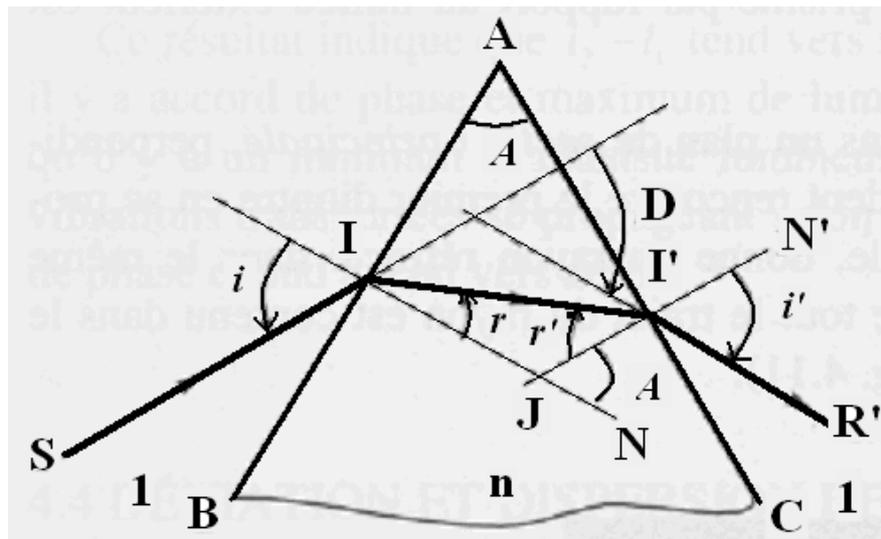
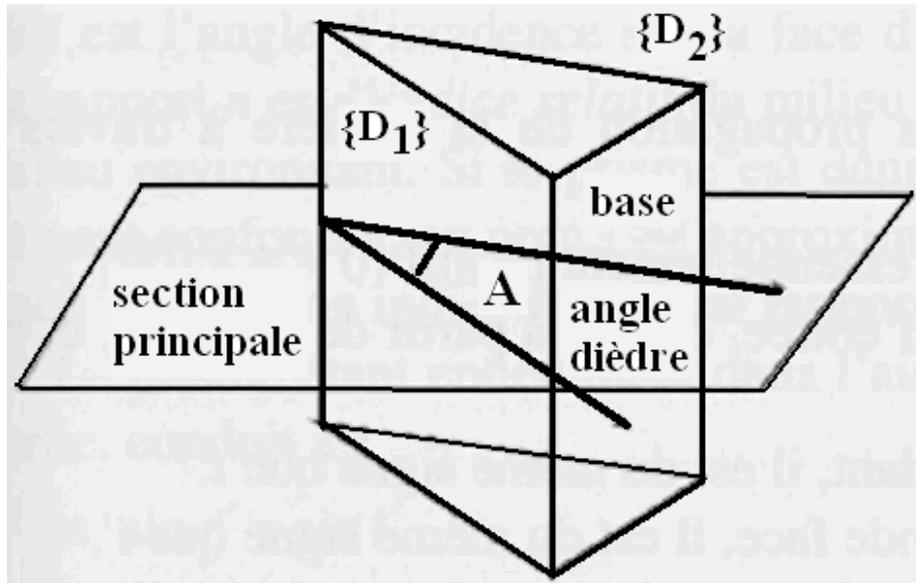
Remarque : le « bleu » est plus dévié que le « rouge »



Vision à travers un prisme : déviation du faisceau

Extrait du *Traité élémentaire de Physique* A. Privat-Deschanel 1869

7.1- Equations du prisme



- Prisme d'indice n
- Loi de la réfraction : en I $\sin i = n \sin r$ et en I' : $n \sin r' = \sin i'$
- Triangle SII' : somme des angles $= \pi \rightarrow A + (\pi/2 - r) + (\pi/2 - r') = \pi$
 $\rightarrow A = r + r'$
- Déviation : $D = D_1 + D_2 = (i - r) + (i' - r') \rightarrow D = i + i' - A$

7.2- Déviation par le prisme

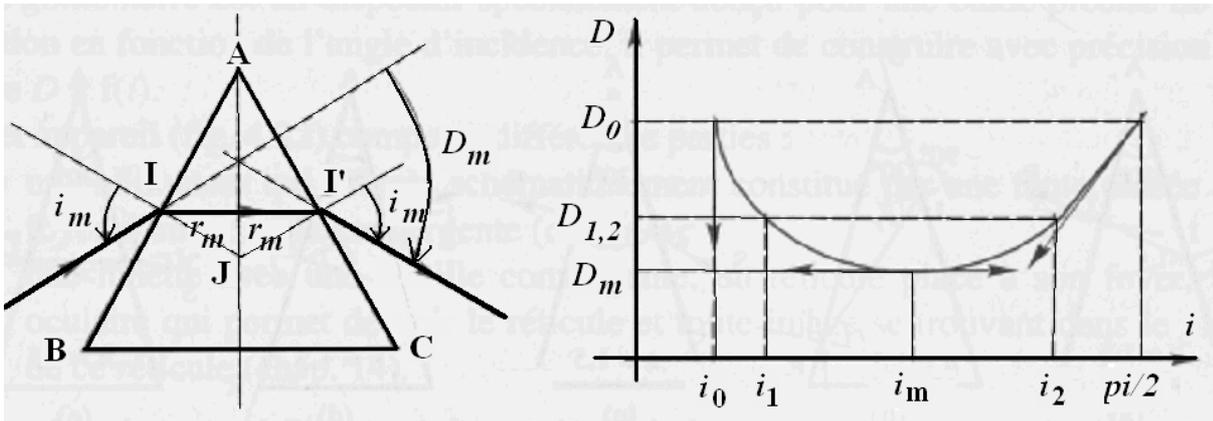
- On montre que $\frac{dD}{dA} = \frac{n \cos r'}{\cos i'} - 1 > 0$ donc $D \uparrow$ si $A \uparrow$

- On montre que $\frac{dD}{dn} = \frac{\sin A}{\cos i' \cos r} > 0$ avec $n(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2}$

on obtient $\frac{dD}{dn} = \frac{dD}{d\lambda} \frac{d\lambda}{dn} = -\frac{2B}{\lambda^3} \frac{dD}{d\lambda} > 0$ et finalement $\frac{dD}{d\lambda} < 0$

→ la **dévi**ation vers la base **D** ↑ **quand** λ ↓ $D_{\text{bleu}} > D_{\text{rouge}}$

7.3- Déviation minimale



Principe du retour inverse de la lumière + **existence d'un minimum** → minimum lorsque la figure est symétrique.

Si D_m déviation minimale, alors :

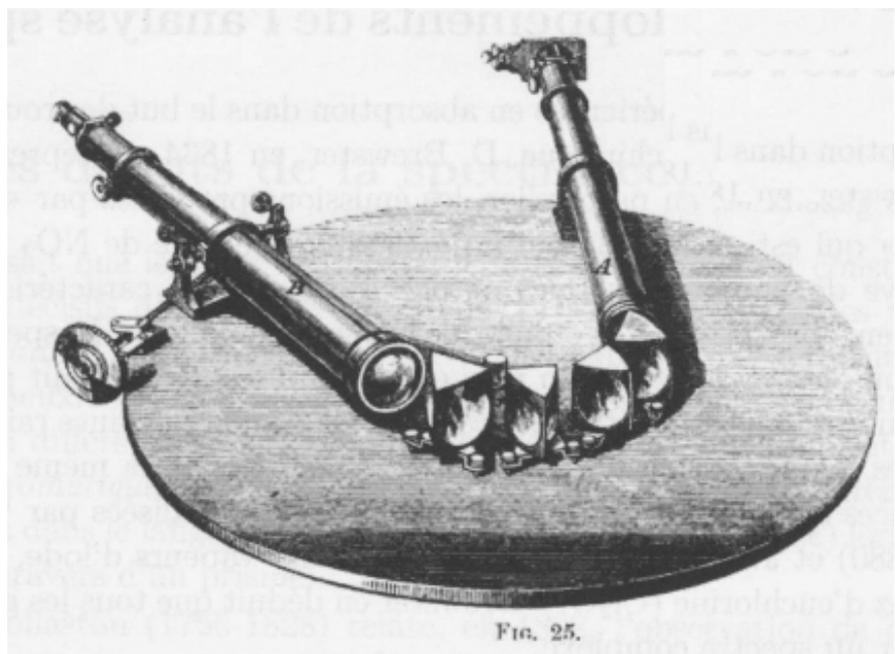
$$i_m = i = i' = (A + D_m)/2$$

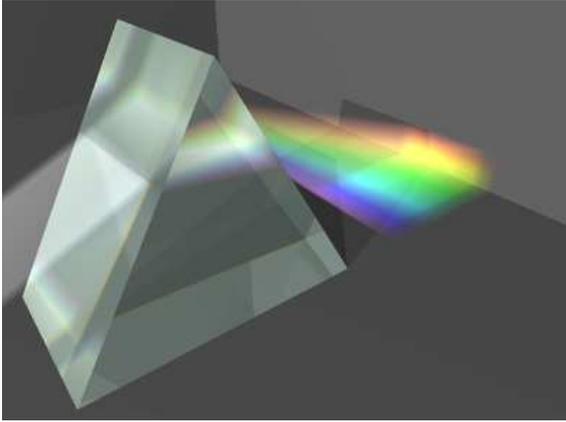
$$r_m = r = r' = A/2$$

$$n = \frac{\sin\left(\frac{A + D_m}{2}\right)}{\sin\left(\frac{A}{2}\right)}$$

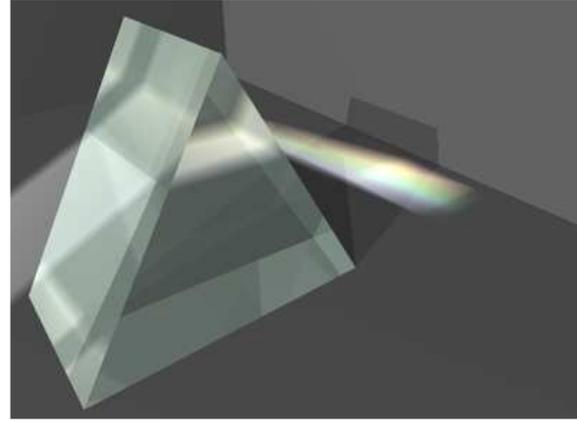
7.4- Effet dispersif du prisme

Spectroscope à plusieurs prismes pour cumuler les déviations
(dispositif utilisé par Kirchhoff en 1870)





Prisme fortement dispersif (verre flint,
etc.)
(à faible constringence $\nu < 50$ typ.)



Prisme faiblement dispersif (verre
crown, etc.)
(à forte constringence $\nu > 50$ typ.)

On montre $\frac{\Delta D}{D} \approx \frac{\Delta n}{n}$

donc si la **constringence** $\nu = \frac{n_D - 1}{\Delta n} \downarrow$ alors la dispersion \uparrow et donc $D \uparrow$

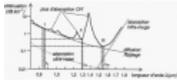
Rappel du §6- La constringence mesure la **dispersion chromatique** du verre à partir des valeurs de :

- indice $n_D \rightarrow \approx$ milieu de la bande visible (raie D du sodium $\lambda = 589,3$ nm)
- écart $\Delta n = n_F - n_C \rightarrow$ variation sur \approx la bande visible (raies C et F de l'hydrogène rouge $\lambda = 656,3$ nm et bleu $\lambda = 486,1$ nm)

Sources des figures et des images :



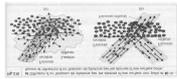
Photo personnelle



Optoélectronique par Zeno Toffano Ellipse 2001



http://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/XML/db/csphysique/metadata/LOM_CSP_Couleur.xml



Optique géométrique T. Bécharrawy De Boeck 2006



Moulage par Mauro Corda http://www.maurocorda.com/http://3.bp.blogspot.com/_w4st7TH384M/TQVLv9wADDI/AAAAAAAAALvo/-soH4ljyM78/s3200/Mauro%2BCorda%2B%252817%2529.jpg



Indonésie © François Mans et Puivert ©B. Velay

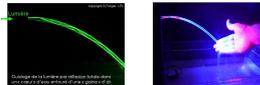


http://www-groups.dcs.st-and.ac.uk/~history/BigPictures/Descartes_7.jpeg

Milieu	Indice
Air à 15°C	1,000293
Eau à 15°C	1,333
Vitre, quartz incolore	1,458
Vitre en creux	1,520
Vitre en feu incolore	1,515
Diamant	2,417
Silicium	3,426

Indice de réfraction pour $\lambda = 589 \text{ nm}$ (Na)

Optique géométrique C. Grossetête et P. Olive Ellipses 2006



http://www-lpl.univ-paris13.fr:8090/fontaine_laser.htm



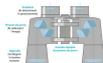
vitrage © Eloïse Dhuy
<http://photos.blogs.liberation.fr/a/6a00d83451a26b69e20120a7c9d2c6970b-500wi.jpg>



http://en.wikipedia.org/wiki/File:Visszat%C3%BCkr%C3%B6z%C3%A9s_prizm%C3%A1n_2.jpg



<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/04/Porro-abbe-prism.png>



http://www.unifrance.fr/centralStorage/ftech/OPTIQUE_optim.pdf



<http://www.filmetrics.com/refractive-index-database>



http://www.sitedesciencesphysiques.fr/?page_id=2170



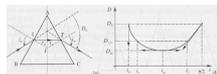
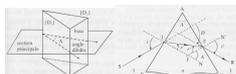
<http://my.opera.com/JagsTreehouse/blog/2008/09/16/richard-wright-pink-floyd-dies-r-i-p>



http://www.lecompendium.com/dossier_optique_67_prisme_monte_sur_pied/prisme_sur_pied.htm



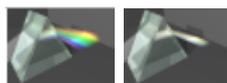
Traité élémentaire de Physique A. Privat-Deschanel 1869



Optique géométrique B. Balland PPUR 2007



Spectroscopie moléculaire E. Biémont De Boeck 2008



http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Prisms_with_high_and_low_dispersion.png

Données :

Applet Java sur les lois de Descartes :

http://www.ostralo.net/3_animations/swf/descartes.swf

Bases de données d'indice de réfraction :

<http://www.filmetrics.com/refractive-index-database> et

<http://www.robinwood.com/Catalog/Technical/Gen3DTuts/Gen3DPages/RefractionIndexList.html>

Applet Java sur le prisme:

<http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/perso/gtulloue/optiqueGeo/prisme/prisme.html>

Sommaire

PROPRIETES OPTIQUES DES MATERIAUX : ABSORPTION, REFLEXION, REFRACTION, DISPERSION...	1
1- Absorption de lumière par le milieu de propagation	1
2- Réflexion de la lumière	3
3- Réfraction lors d'un changement de milieu	5
4- Phénomène de réflexion totale	6
5- Aspect énergétique pour la réflexion vitreuse	7
6- Indice de réfraction $n(\lambda)$ et dispersion chromatique d'un matériau transparent	9
7- Dispersion d'un faisceau de lumière par un prisme	10
Sources des figures et des images :	14
Données :	15
Sommaire	15