

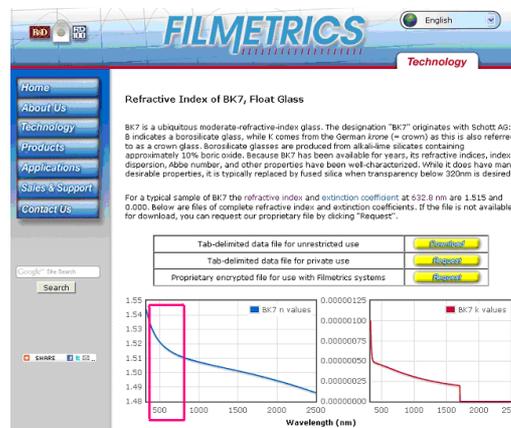
Propriétés optiques des matériaux : réflexion, réfraction, dispersion, absorption...

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

1- Indice de réfraction $n(\lambda)$ pour le visible 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)



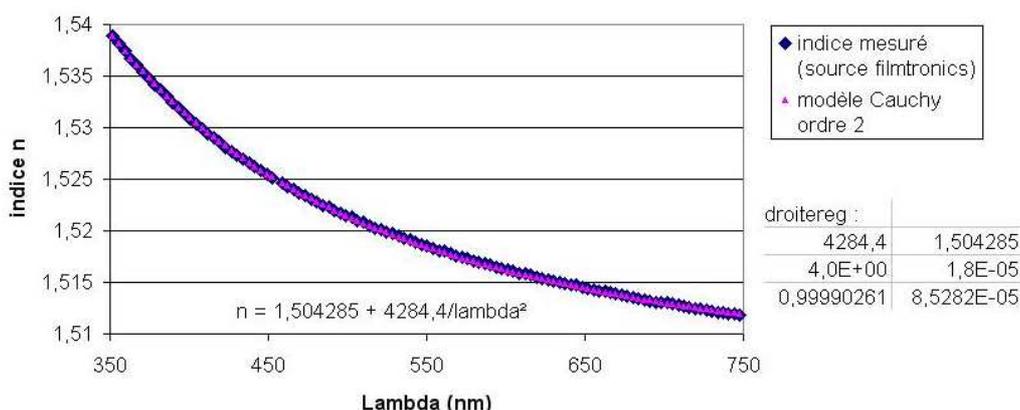
Dans le visible, l'indice de réfraction d'un matériau transparent varie peu mais suffisamment pour disperser la lumière (prisme, arc-en-ciel)

Les faibles variations de n sont décrites par un modèle de Cauchy à deux paramètres:

$$n(\lambda) = A + B / \lambda^2 \quad (\text{par exemple, données expérimentales issues rectangle rose})$$

Exemple : un verre d'indice médian $n \approx 1.52$ (dans le vert), n varie seulement d'environ 0.03 entre le bleu et le rouge.

indice optique d'un verre BK7



2- Propagation des rayons lumineux dans un matériau

2.1- Propagation de la lumière à la vitesse c/n

- **vitesse de la lumière dans le vide maximale** $c = 299\,792\,458\text{ m.s}^{-1}$
 $c_{\text{air}} \approx c_{\text{vide}} \approx 3\,10^8\text{ m.s}^{-1} \approx 300\,000\text{ km.s}^{-1}$ (indice $n_{\text{vide}} = 1.0 \approx n_{\text{air}}$)
- **vitesse de la lumière dans un milieu** $c/n < c$ donc $n > 1$!
 ex : $c_{\text{verre}} \approx 200\,000\text{ km.s}^{-1}$ dans un verre d'indice $n_{\text{verre}} = 1.5$

2.2- Propagation rectiligne ou non

- Propagation rectiligne dans un **milieu d'indice optique n uniforme** (même valeur de n en tout point de l'espace, à λ donné)



Propagation dans de l'air homogène $n \approx 1$

- Propagation non rectiligne de la lumière si indice n n'est pas uniforme

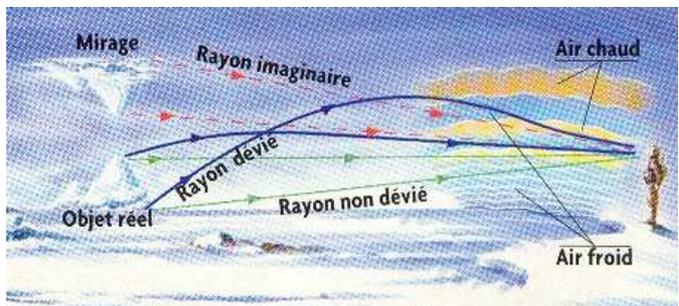
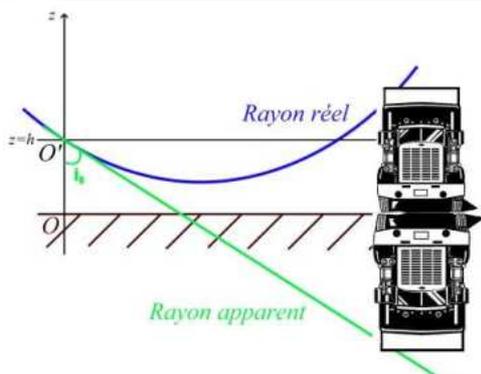


Propagation dans de l'eau sucrée (excès de sucre au fond)
 Trajectoire courbée en allant vers une zone $n \uparrow$.

L'indice optique peut varier en fonction : de la composition chimique, de la concentration, de la température ...

2.3- Mirages optiques

Exemple : $n_{\text{air}} \uparrow$ si $\rho_{\text{air}} \uparrow$ (masse volumique). Or pour un gaz $\rho_{\text{air}} \uparrow$ si $T \downarrow$.
 Donc $n_{\text{air}} \uparrow$ si $T \downarrow$ avec la trajectoire courbée vers $n \uparrow$.

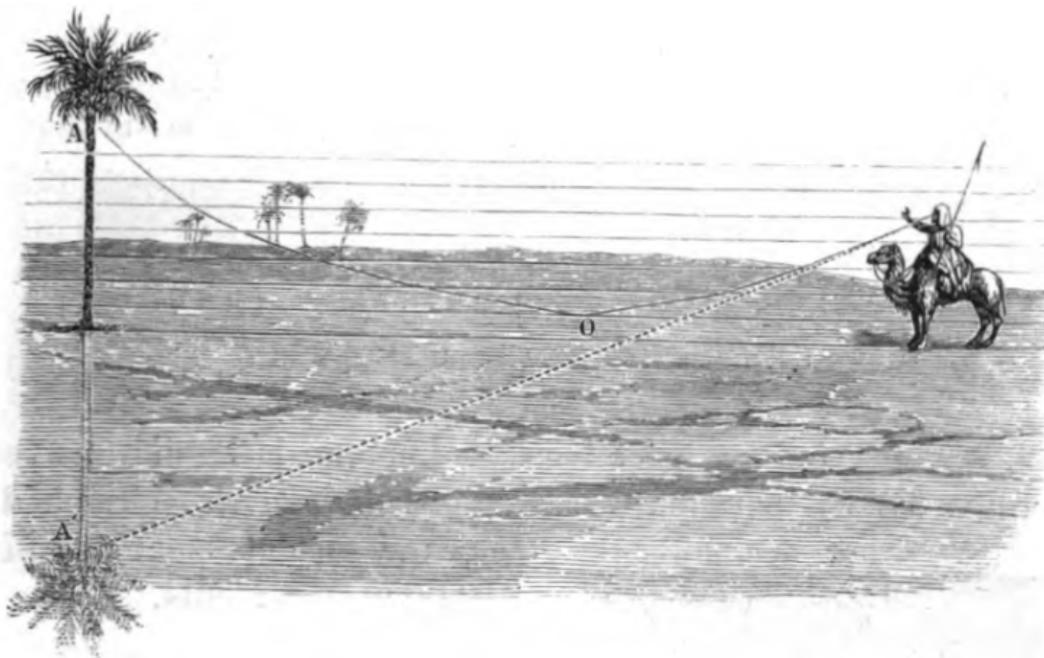


Mirage inférieur : camion « dans la route »

Mirage inférieur : iceberg « flottant »

L'indice $n(T)$ diminue lorsqu'on se rapproche du sol plus chaud

L'indice $n(T)$ augmente lorsqu'on se rapproche du sol plus froid



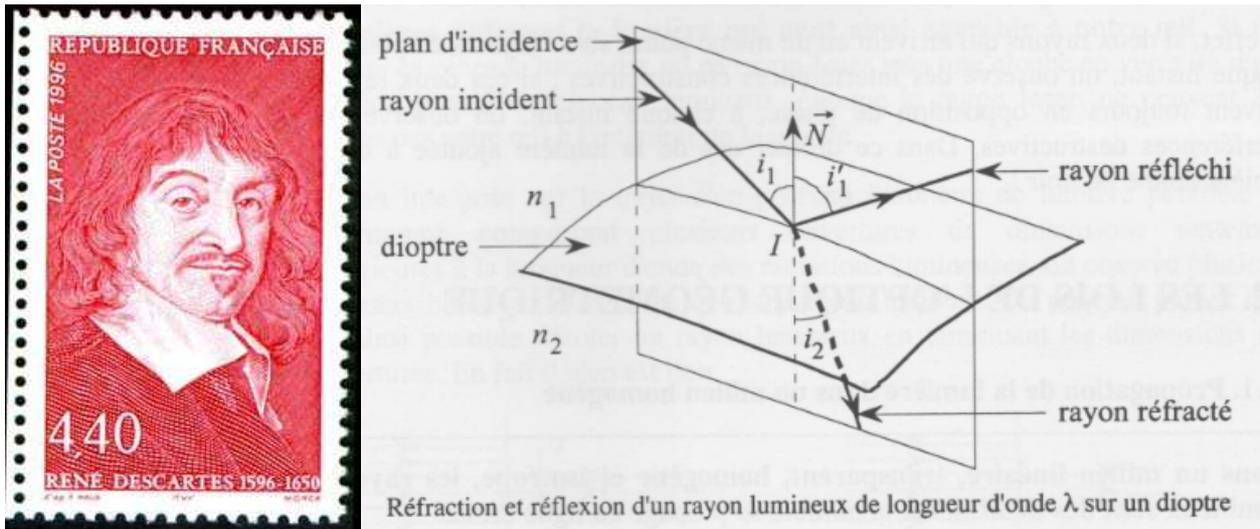
Extrait de *Traité élémentaire de physique expérimentale et appliquée* A. Ganot 1847

3- Réflexion / Réfraction lors d'un changement de milieu

- Dioptre : interface de deux milieux transparents

Sur un dioptre, on vérifie les lois de Descartes :

- **Rayons coplanaires** : les rayons restent tous dans le plan d'incidence.
- **Réflexion achromatique avec symétrie $i_1 = i'_1$**
(angles comptés en valeur absolue, repérés par rapport à la normale)



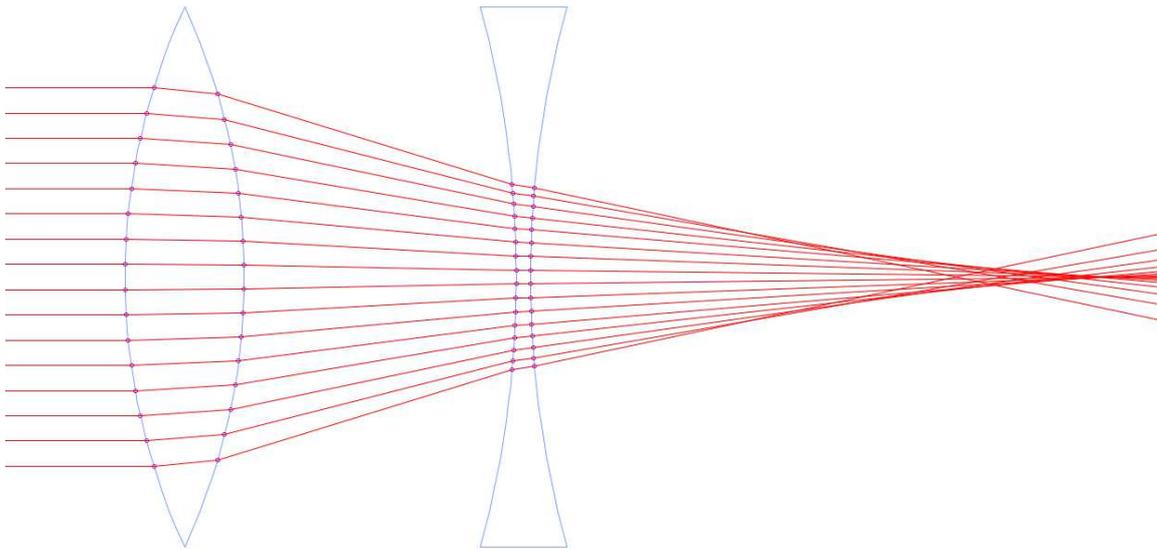
- **Réfraction chromatique avec asymétrie : $n_1 \sin(i_1) = n_2 \sin(i_2)$**
l'angle réfracté dépend des indices « de réfraction » $n(\lambda)$ donc de λ .



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 : $n_2 < n_1 \rightarrow i_2 > i_1$



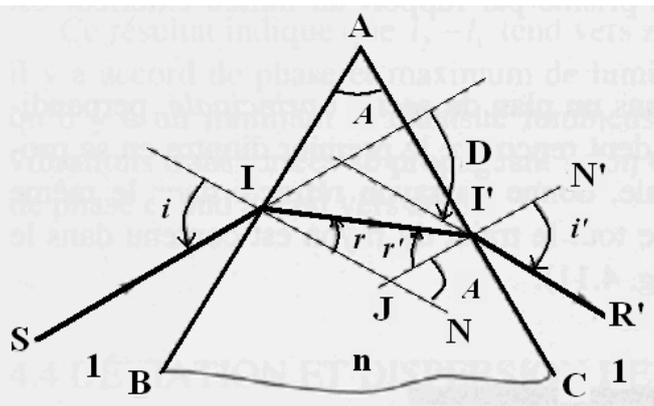
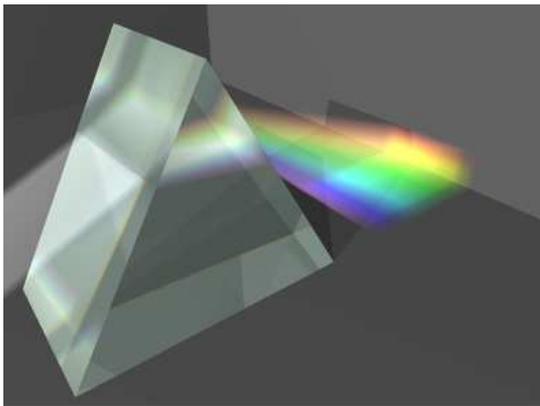
La réfraction gouverne les directions de propagation des rayons dans un système optique

- Pour un rayon **sortant du milieu le plus réfringent**, avec un angle d'incidence

$$i > i_{\text{lim}} \text{ il y a } \mathbf{r\acute{e}flexion\ totale} \quad n_1 > n_2 \rightarrow \sin(i_{\text{lim}}) = \frac{n_2}{n_1}$$

Application : fonctionnement d'une fibre optique

- L'angle i' de sortie du rayon réfracté dépend de $n(\lambda)$: **le prisme est dispersif**. Le trajet des différents rayons colorés n'est pas le même.



Prisme d'indice n , d'angle au sommet A

Loi de la réfraction : en I $\sin i = n \sin r$ et en I' : $n \sin r' = \sin i'$

Triangle $SI'I'$: somme des angles = $\pi \rightarrow A + (\pi/2 - r) + (\pi/2 - r') = \pi$
 $\rightarrow \mathbf{A = r + r'}$

Déviation : $D = D_1 + D_2 = (i - r) + (i' - r') \rightarrow \mathbf{D = i + i' - A}$

4- Aspect énergétique pour un dioptre



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) :**

$$F_{\text{incident}} = F_{\text{réfléchi}} + F_{\text{transmis}}$$

- **Flux optique réfléchi :** $F_{\text{réfléchi}} = R \times F_{\text{incident}}$
avec le coefficient énergétique de réflexion R :
MAIS $R = 1 = 100\%$ en réflexion totale !
 $R \approx 4\%$ pour un dioptre air / verre
avec $n_1 = 1$ (air) et $n_2 = 1.5$ (verre)

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

- **Flux optique transmis :** $F_{\text{transmis}} = T \times F_{\text{incident}}$
avec le coefficient énergétique de réfraction T :
MAIS $T = 0$ en réflexion totale !
 $T \approx 1 - 4\% = 96\%$ pour un dioptre air / verre

$$T = 1 - R$$

Réfectivité :

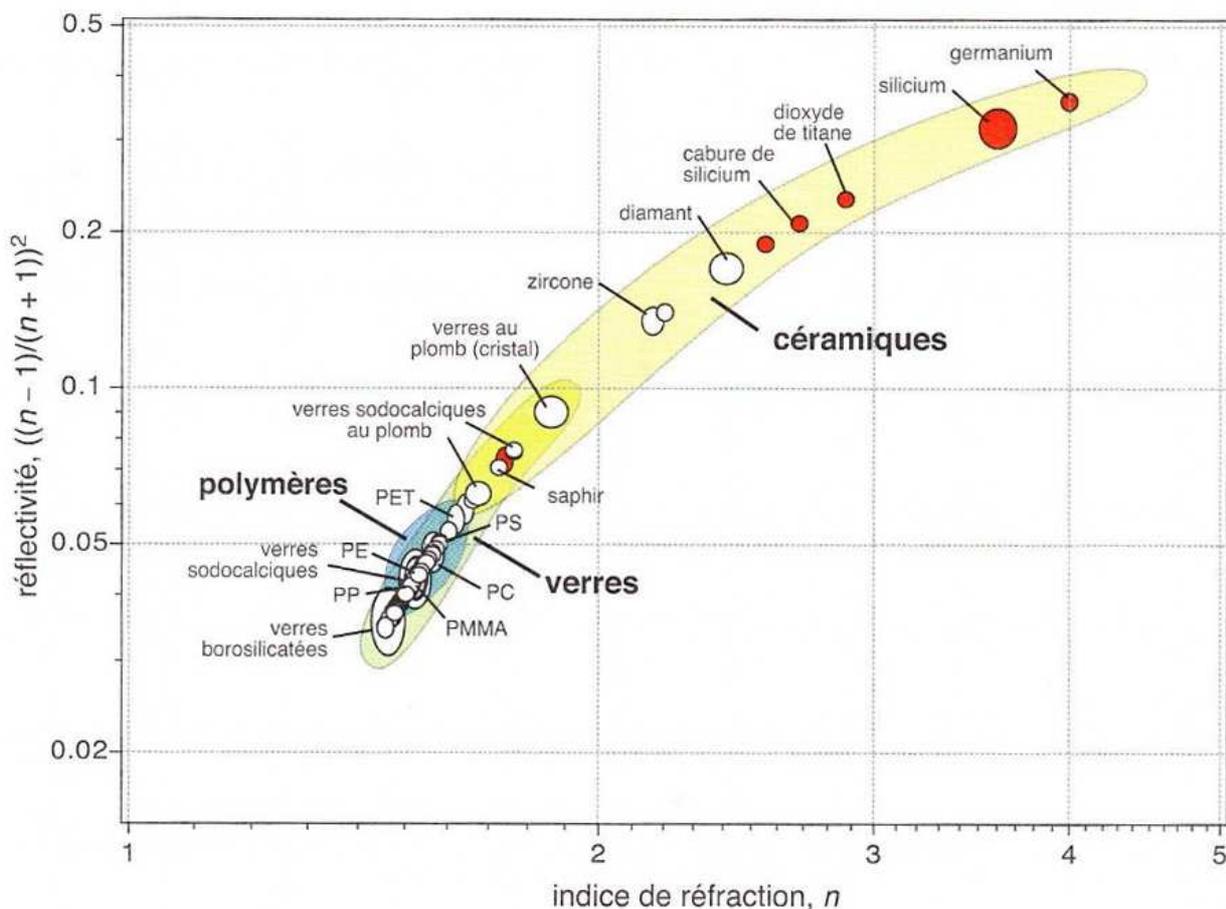


Table (n, R) des principaux matériaux pour l'optique et l'optoélectronique

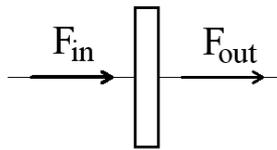
5- Absorption de lumière par le milieu de propagation

5.1- Filtres absorbant à densité neutre

- Composant utilisé pour faire diminuer le flux $F \downarrow$

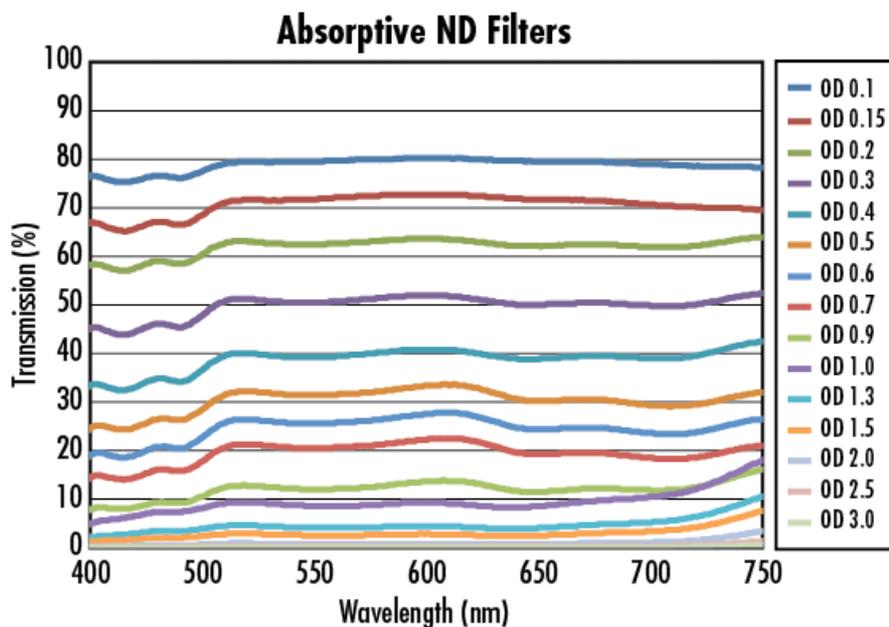
- Transmission du filtre

$$A = \frac{F_{out}}{F_{in}}$$

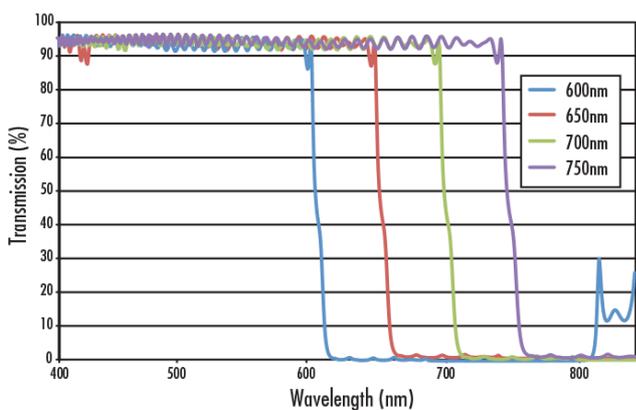


ex : si $A = 0,1$ seul 10% du flux passe le filtre

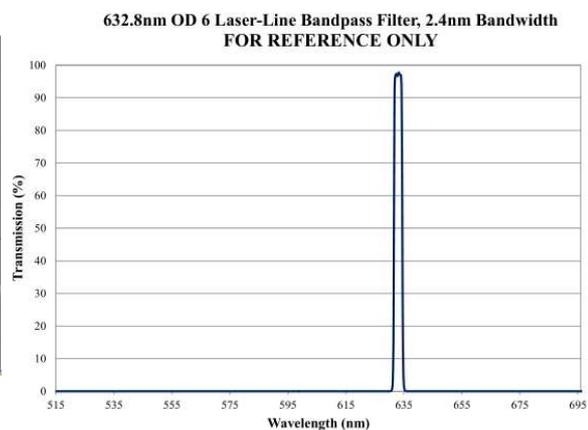
- A traduit la perte par absorption $0 \leq A \leq 1$
matériau : opaque $A = 0$, transparent $A \approx 1=100\%$
- Selon le modèle : A fixé ou réglable (orientation)
- A est sensé être indépendant de la couleur λ (on dit «à densité neutre »)



5.2- Filtres absorbant sélectif (action différente selon la plage de couleur)

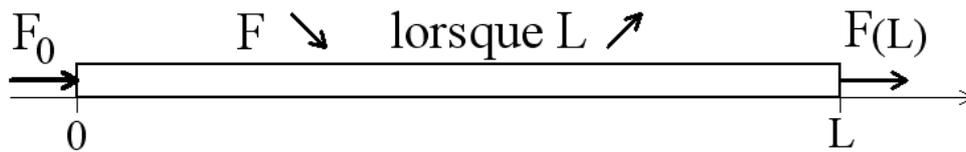


Filtre passe-bas dichroïque



Filtre passe-bande très sélectif

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



- Le flux de lumière traversant un cylindre de section constante décroît exponentiellement lorsque sa longueur L augmente.

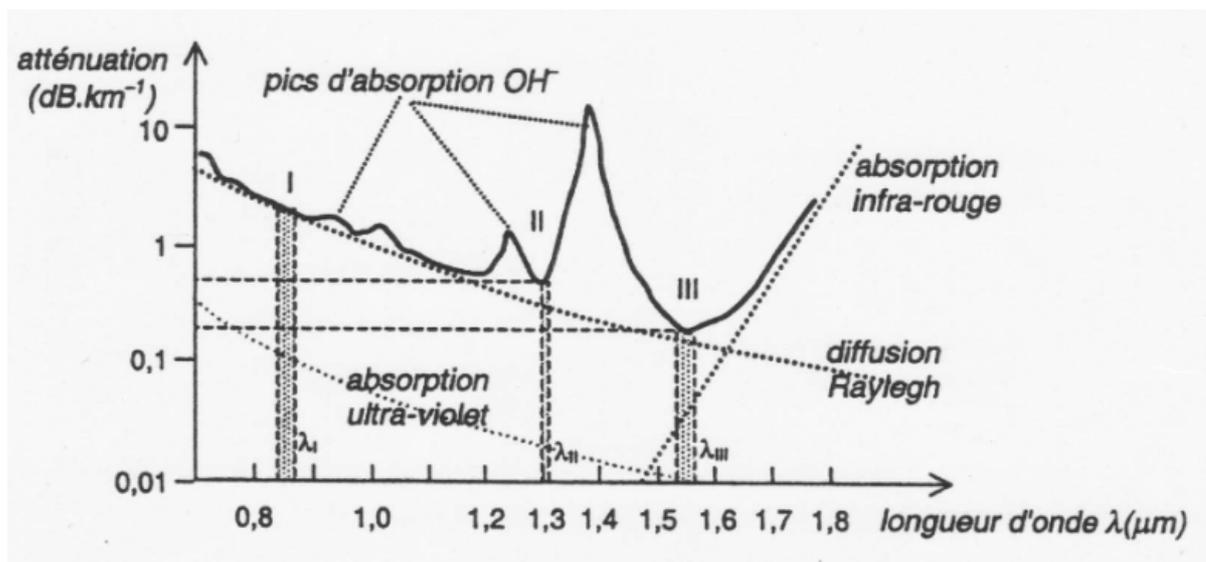
- Transmission A selon l'épaisseur (sans unité) $A = \frac{F(L)}{F_0} = \exp(-\alpha(\lambda) \times L)$

où la longueur L est prise en m.

- $\alpha(\lambda)$ coefficient d'absorption (en m^{-1}) caractérise le milieu de propagation.

$$\alpha(\lambda) = \frac{A_{\text{dB.km}^{-1}}}{4340} = \frac{A_{\text{dB.m}^{-1}}}{4.340} \quad \text{atténuation linéique en dB.km}^{-1} \text{ ou dB.m}^{-1}$$

- Exemple : utilisation optimale d'une **fibre optique « silice »** (verre) dans l'IR



Atténuation linéique pour le verre de fibre optique

Le **minimum d'atténuation** du verre est dans l'IR à $1.55 \mu\text{m}$

$$A_{\text{dB.km}^{-1}}(\lambda_{\text{III}} = 1,55 \mu\text{m}) \approx 0,2 \text{ dB.km}^{-1}$$

Il reste 10% du flux initial après un trajet de 50 km dans la fibre

$$A = \exp(-\alpha \times L) = \exp\left(-\frac{A_{\text{dB.km}^{-1}}}{4340} \times L\right) = \exp\left(-\frac{0,2}{4340} \times 50000\right) = 0,1 = 10\%$$

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

Remarques sur le graphe :

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)

- Exemple : pertes à la **traversée d'une lentille** de verre utilisée dans le visible

Pour le **visible**, on extrapole une lecture sur la courbe, soit $A \approx 20 \text{ dB.km}^{-1}$

Pour une lentille optique de 1 cm d'épaisseur (au plus !) soit 10^{-2} m , on a :

$A \approx \exp(-20 \times 0.01 / 4340) \approx 0.999954$ Phénomène plus que négligeable !

C'est la réflexion sur chacune des faces qui pénalise le flux transmis :

diopre entrée ($T=0.96 \rightarrow A \approx 1 \rightarrow T=0.96$) diopre sortie

Il reste en sortie $T \times A \times T = 0.96^2 \approx 0.92 = 92\%$ du flux incident.

5.4- Atténuation A_{dB} (en dB) $A_{dB} = -10 \log_{10}(A)$

- Une échelle logarithmique facilite l'usage des nombres très petits

$$A_{dB} = -10 \log_{10} \left(\frac{F(L)}{F_0} \right) = -10 \log_{10} (\exp(-\alpha(\lambda) \times L))$$

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

- Caractérisation du matériau par l'atténuation linéique en dB.m^{-1} ou dB.km^{-1}

$$A_{dB.m^{-1}} = \frac{A_{dB}}{L(\text{en m})} = \frac{10}{\ln(10)} \times \alpha(\lambda) = 4.34 \alpha(\lambda)$$

$$A_{dB.km^{-1}} = \frac{A_{dB}}{L(\text{en km})} = 4340 \alpha(\lambda)$$

- $A_{dB} = A_{dB.m^{-1}} \times L(\text{en m})$ et $A = 10^{-\frac{A_{dB}}{10}}$

Il serait facile de confondre A , A_{dB} et $A_{dB.m^{-1}}$...

- **Exemple précédent de la fibre** : il reste 10% du flux initial après 50 km car $A_{dB} = 0.2 \text{ dB/km} \times 50 \text{ km} = 10 \text{ dB}$ et $A = 10^{-10/10} = 10^{-1} = 0.1 = 10\%$

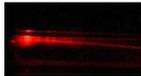
Sources des figures et des images :

Milieu	Indice
Air sec à 15°C	1,000 277
Eau à 15°C	1,333
Alcôve, quartz foncé	1,458
Vitre au crown	1,517
Vitre au flint leger	1,515
Alcôve	1,585
Indice de réfraction pour $\lambda = 589 \text{ nm}$ (Na)	

Optique géométrique C. Grossetête et P. Olive Ellipses 2006



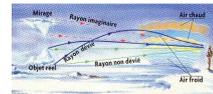
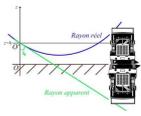
<http://www.filmetrics.com/refractive-index-database>



<http://lyceebrizeux.cpgc.pagesperso-orange.fr/Mirages.htm>



http://www.linternaute.com/photo_numerique/temoignage/temoignage/196513/effet-de-mirage/



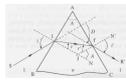
<http://tpemirages3.free.fr/inferieurs.htm>



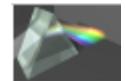
<http://www.ipev.fr/pages/TerreAdelie/AccueilTA57.html>



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



Optique géométrique B. Balland PPUR 2007



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

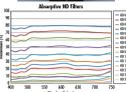


vitrage © Eloïse Dhuy

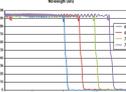
<http://photos.blogs.liberation.fr/.a/6a00d83451a26b69e20120a7c9d2c6970b-500wi.jpg>



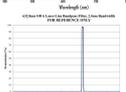
Photo personnelle



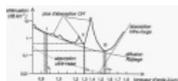
<https://www.edmundoptics.fr/optics/optical-filters/neutral-density-filters/1.0-od-12.5mm-dia-absorptive-nd-filter/>



<https://www.edmundoptics.fr/optics/optical-filters/shortpass-edge-filters/550nm-12.5mm-diameter-dichroic-shortpass-filter/#specs>



<https://www.edmundoptics.fr/optics/optical-filters/bandpass-filters/632.8nm-CWL-12.5mm-Dia2.4nm-BandwidthOD6-Laser-Line-Bandpass-Filter/>



Optoélectronique par Zeno Toffano Ellipse 2001

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 :

REFLEXION, REFRACTION, DISPERSION, ABSORPTION.....	1
1- Indice de réfraction $n(\lambda)$ pour le visible et dispersion chromatique d'un matériau transparent	1
2- Propagation des rayons lumineux dans un matériau	2
3- Réflexion / Réfraction lors d'un changement de milieu.....	4
4- Aspect énergétique pour un dioptré	6
5- Absorption de lumière par le milieu de propagation	8
Sources des figures et des images :	11
Données :	12
Sommaire	12