

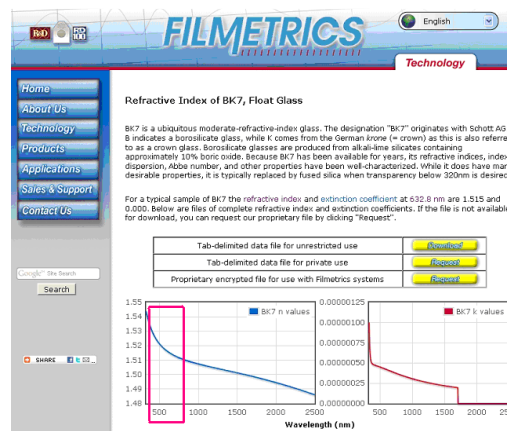
# Propriétés optiques des matériaux : réflexion, réfraction, dispersion, absorption...

- 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  $\lambda$ , ...)
- ± **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)



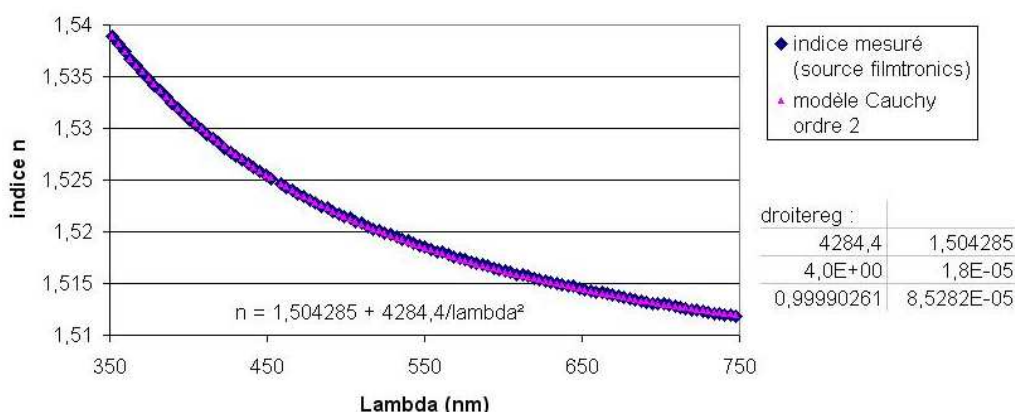
Dans le visible, l'indice de réfraction d'un matériau transparent varie peu mais suffisamment pour disperser la lumière (prisme, arc-en-ciel)

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  $\lambda$  donné)



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

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

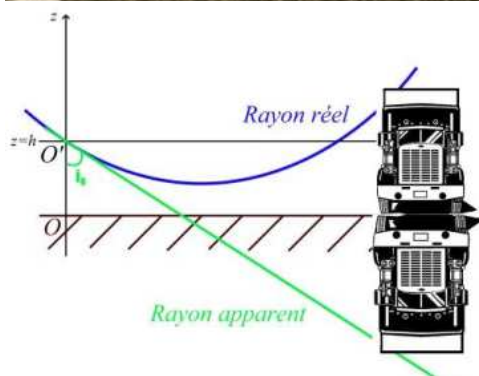


Propagation dans de l'eau sucrée (excès de sucre au fond)  
 Trajectoire courbée en allant vers une zone  $n \uparrow$ .

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  $n \uparrow$ .

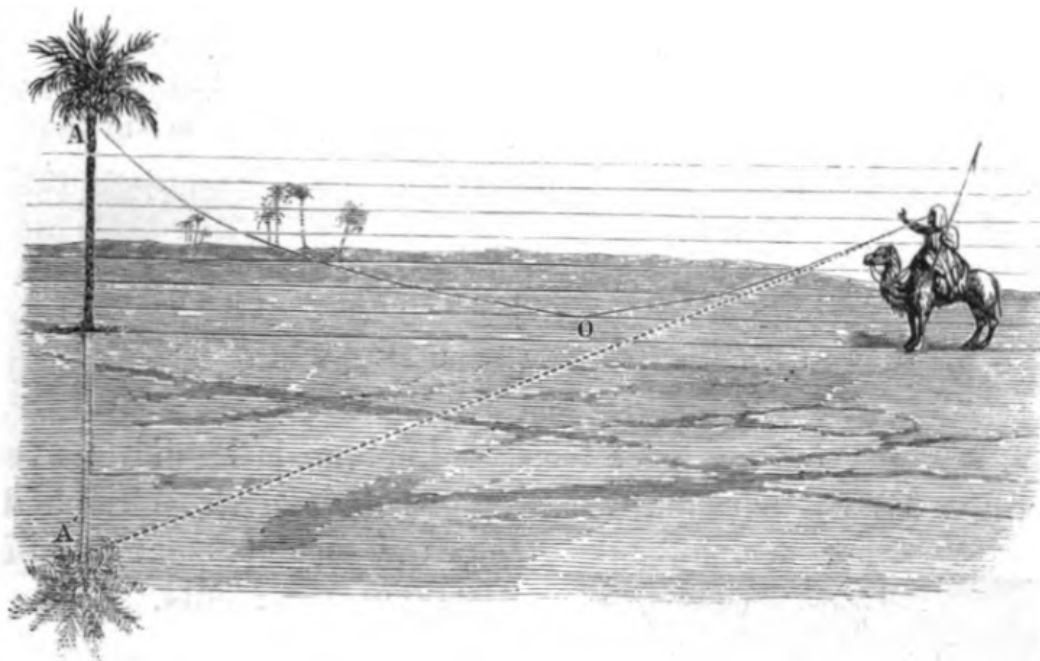


**Mirage inférieur : camion « dans la route »**

**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



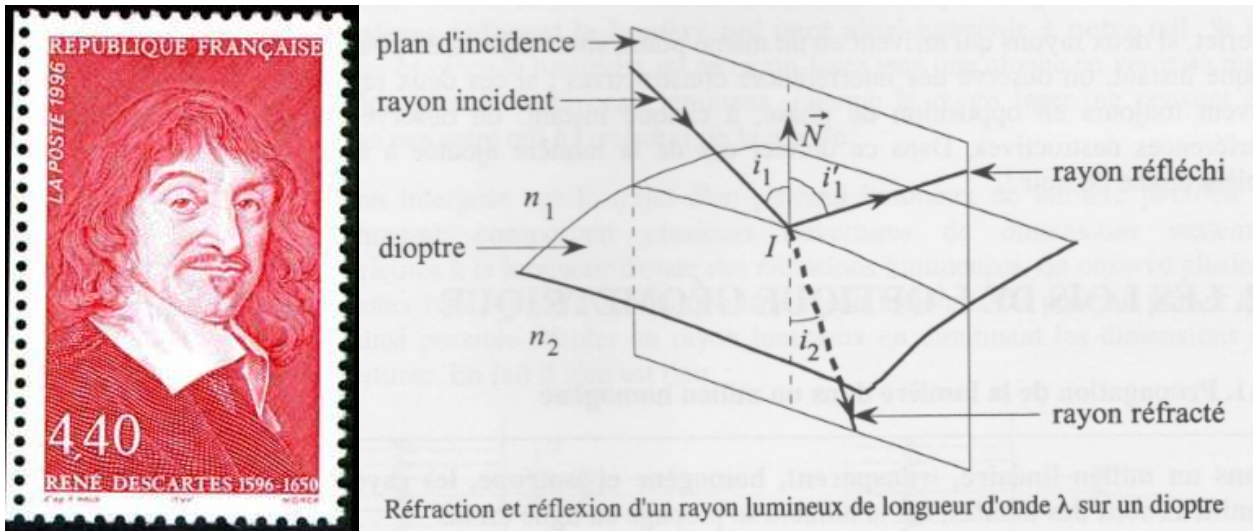
Extrait de *Traité élémentaire de physique expérimentale et appliquée* A. Ganot 1847

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

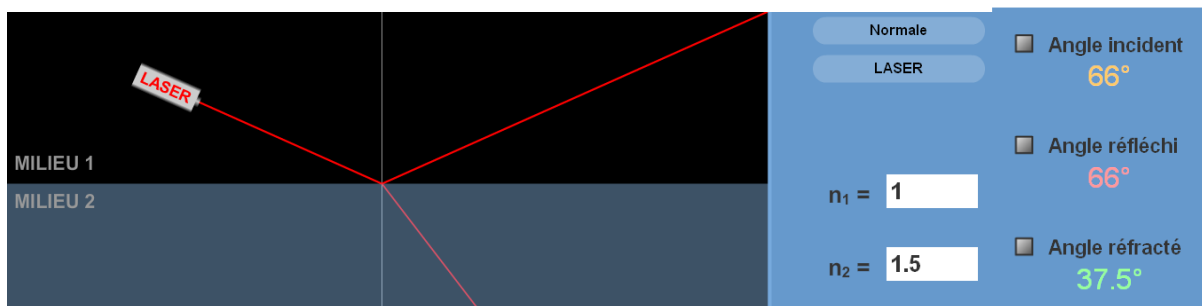
- Dioptre : interface de deux milieux transparents

Sur un dioptre, on vérifie les lois de Descartes :

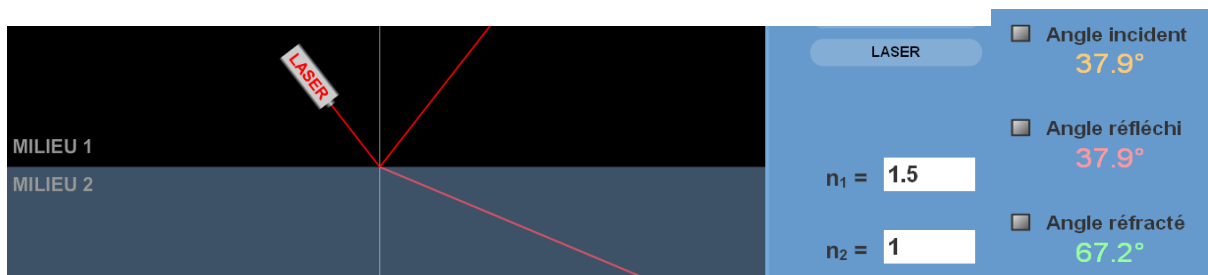
- **Rayons coplanaires** : les rayons restent tous dans le plan d'incidence.
- **Réflexion achromatique avec symétrie  $i_1 = i'_1$**   
(angles comptés en valeur absolue, repérés par rapport à la normale)



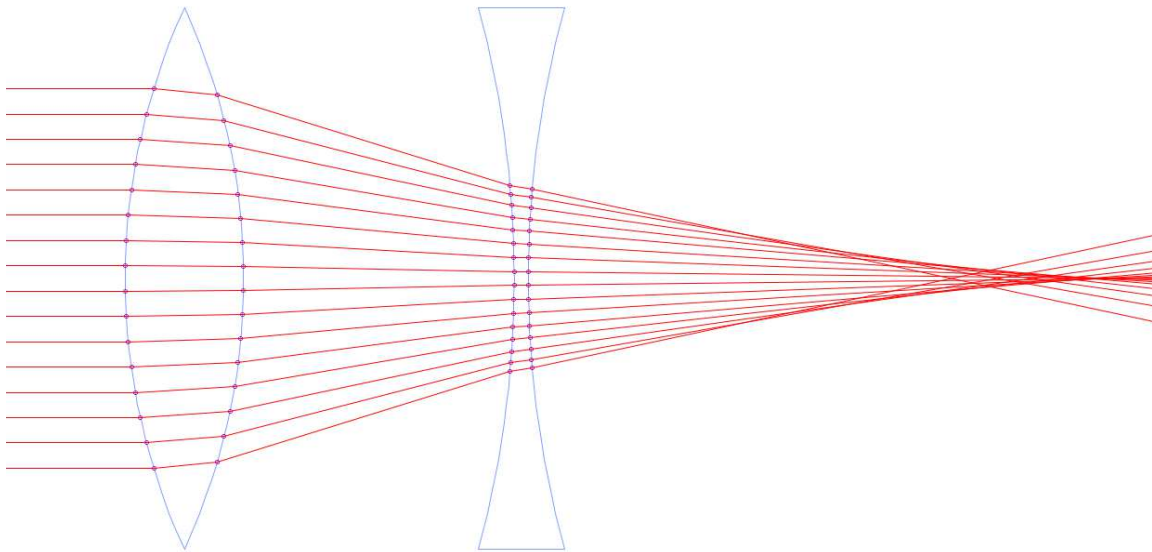
- **Réfraction chromatique avec asymétrie :  $n_1 \sin(i_1) = n_2 \sin(i_2)$**   
l'angle réfracté dépend des indices « de réfraction »  $n(\lambda)$  donc de  $\lambda$ .



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 :  $n_2 < n_1 \rightarrow i_2 > i_1$



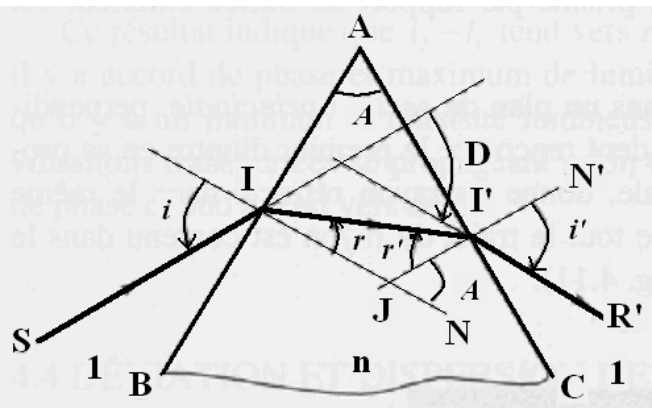
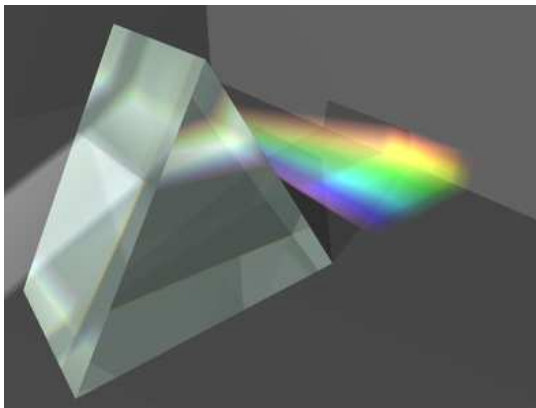
La réfraction gouverne les directions de propagation des rayons dans un système optique

- 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 :**

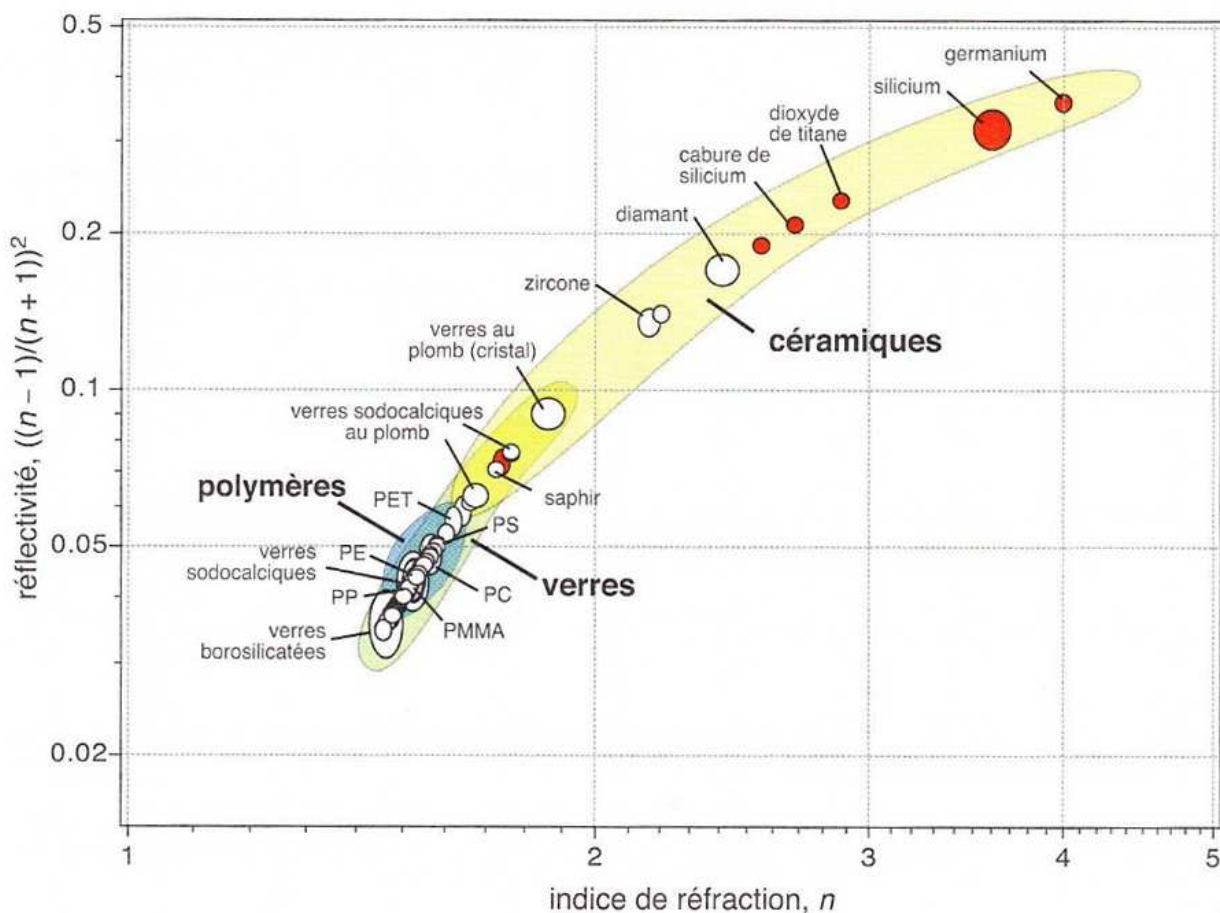


Table (n, R) des principaux matériaux pour l'optique et l'optoélectronique

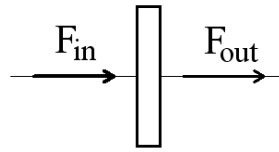
## 5- Absorption de lumière par le milieu de propagation

### 5.1- Filtres absorbant à densité neutre

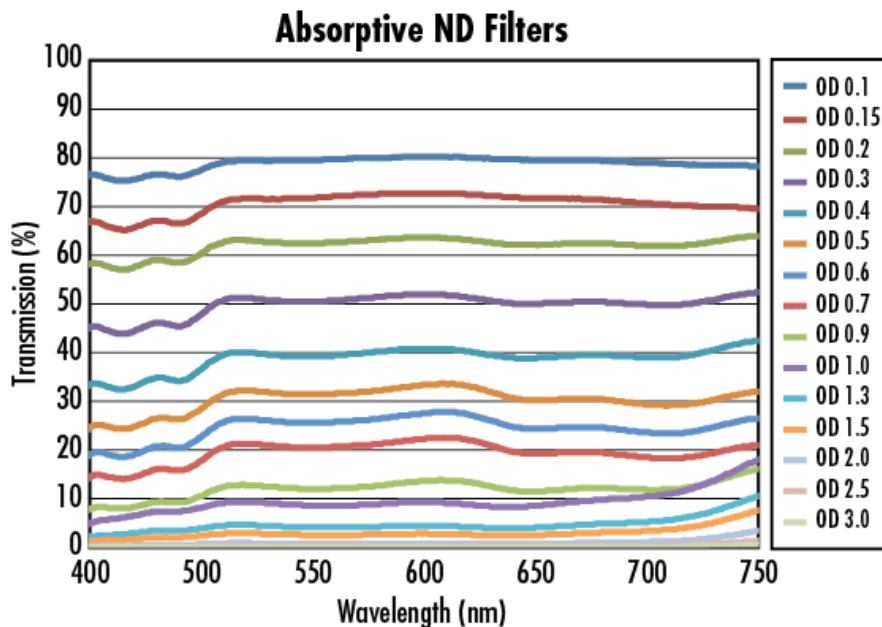
- Composant utilisé pour faire diminuer le flux  $F \downarrow$

- Transmission du filtre  $A = \frac{F_{out}}{F_{in}}$

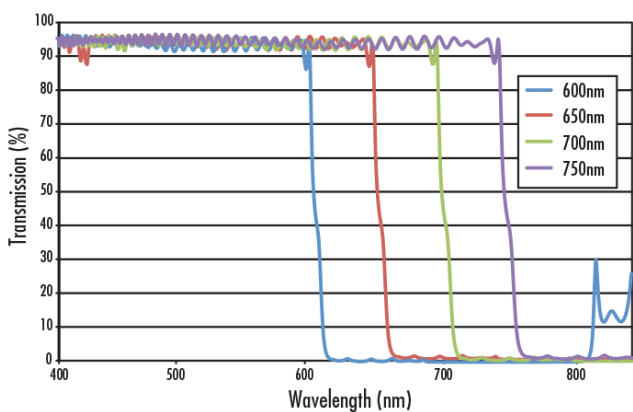
ex : si  $A = 0,1$  seul 10% du flux passe le filtre



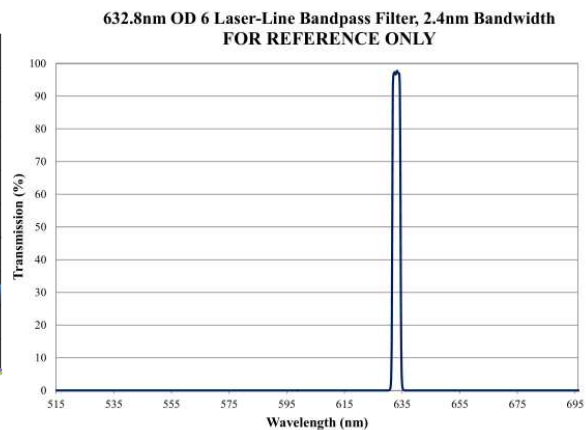
- $A$  traduit la perte par absorption  $0 \leq A \leq 1$   
matériau : opaque  $A = 0$ , transparent  $A \approx 1=100\%$
- Selon le modèle :  $A$  fixé ou réglable (orientation)
- $A$  est sensé être indépendant de la couleur  $\lambda$  (on dit «à densité neutre »)



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



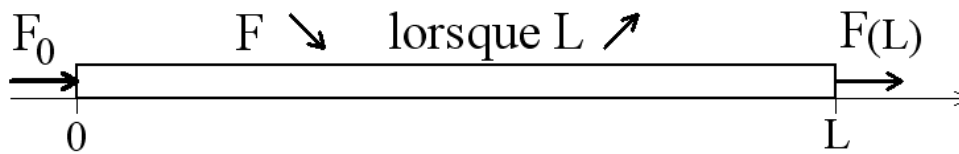
Filtre passe-bas dichroïque



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 exponentielle-ment lorsque sa longueur L augmente.

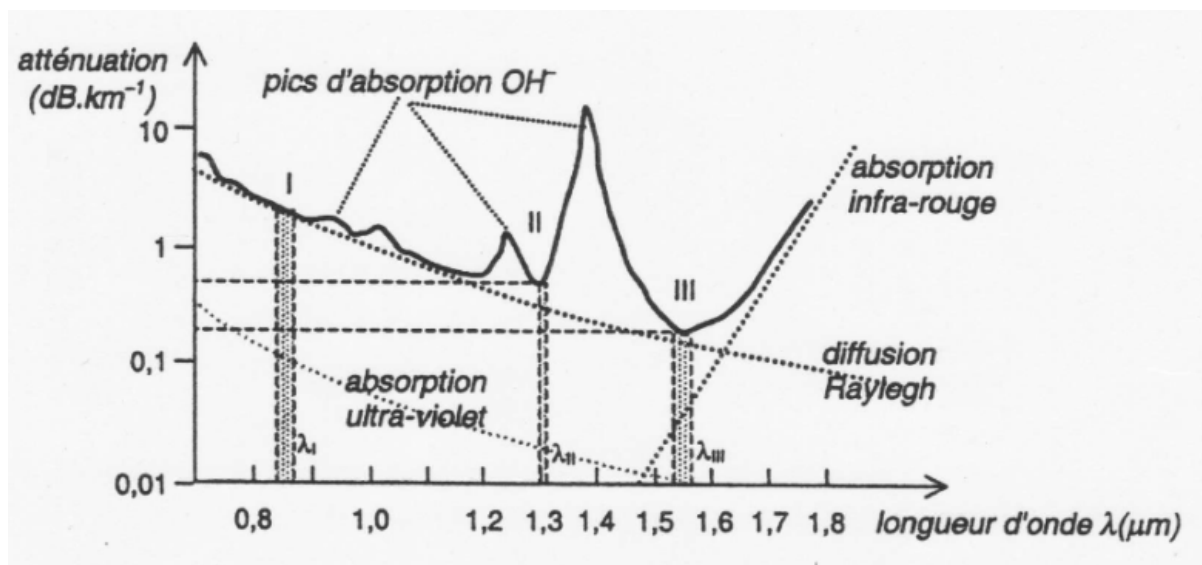
- Transmission A selon l'épaisseur (sans unité)  $A = \frac{F(L)}{F_0} = \exp(-\alpha(\lambda) \times L)$

où la longueur L est prise en m.

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

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

- 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  $\mu m$

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

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

$$A = \exp(-\alpha \times L) = \exp\left(-\frac{A_{dB.km^{-1}}}{4340} \times L\right) = \exp\left(-\frac{0.2}{4340} \times 50000\right) = 0.1 = 10\%$$

→ 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  $\lambda^{-4}$ , ce phénomène est responsable de la forte atténuation aux basses longueurs d'onde.
- **Absorption intrinsèque**, sous forme de pics, due aux ions OH<sup>-</sup> 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  $10^{-2} \text{ m}$ , on a :

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

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

dioptré entrée (  $T=0.96 \rightarrow A \approx 1 \rightarrow T=0.96$  ) dioptré 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  $\text{dB.m}^{-1}$  ou  $\text{dB.km}^{-1}$

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

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

- $A_{dB} = A_{dB.m^{-1}} \times L(\text{en m})$  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  $A = 10^{-10/10} = 10^{-1} = 0.1 = 10\%$

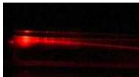
# Sources des figures et des images :

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 $\lambda = 589 \text{ nm}$ (D)	

Optique géométrique C. Grossetête et P. Olive Ellipses 2006



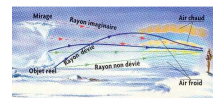
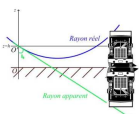
<http://www.filmetrics.com/refractive-index-database>



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



[http://www.linternaute.com/photo\\_numerique/temoignage/temoignage/196513/effet-de-mirage/](http://www.linternaute.com/photo_numerique/temoignage/temoignage/196513/effet-de-mirage/)



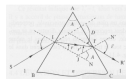
<http://tpemirages3.free.fr/inferieurs.htm>



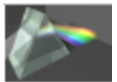
<http://www.ipev.fr/pages/TerreAdelie/AccueilTA57.html>



[http://www-groups.dcs.st-and.ac.uk/~history/BigPictures/Descartes\\_7.jpeg](http://www-groups.dcs.st-and.ac.uk/~history/BigPictures/Descartes_7.jpeg)



Optique géométrique B. Balland PPUR 2007



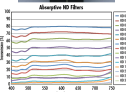
[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Prisms\\_with\\_high\\_and\\_low\\_dispersion.png](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Prisms_with_high_and_low_dispersion.png)



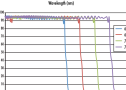
vitrage © Eloïse Dhuy  
<http://photos.blogs.liberation.fr/.a/6a00d83451a26b69e20120a7c9d2c6970b-500wi.jpg>



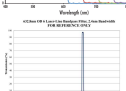
Photo personnelle



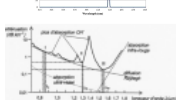
<https://www.edmundoptics.fr/optics/optical-filters/neutral-density-filters/1.0-od-12.5mm-dia-absorptive-nd-filter/>



<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](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