

VERRE ET OPTIQUE, UNE HISTOIRE LINÉAIRE POUR COMMENCER

WILFRIED BLANC
INSTITUT DE PHYSIQUE DE NICE
UNIV. CÔTE D'AZUR, CNRS

USTV UNION POUR LA SCIENCE &
LA TECHNOLOGIE VERRIÈRES

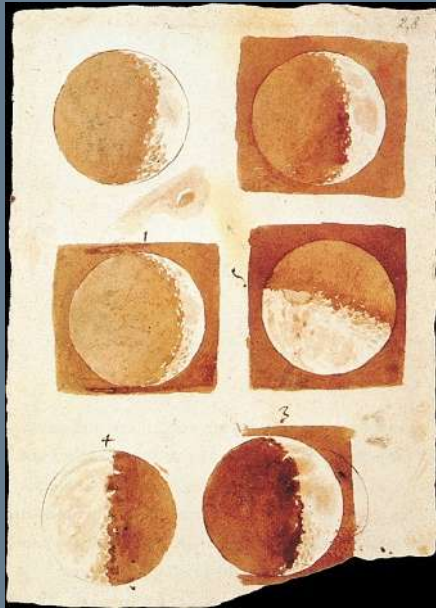
INPHYNI **cnrs** UNIVERSITÉ
CÔTE D'AZUR

VERRE ET OPTIQUE

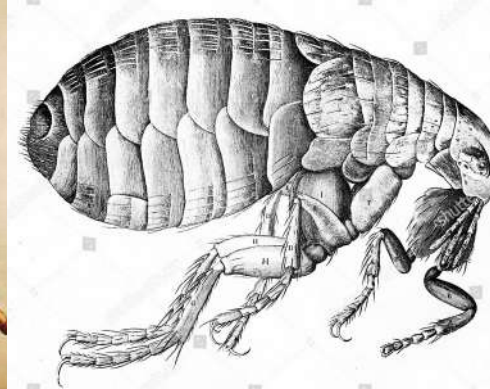
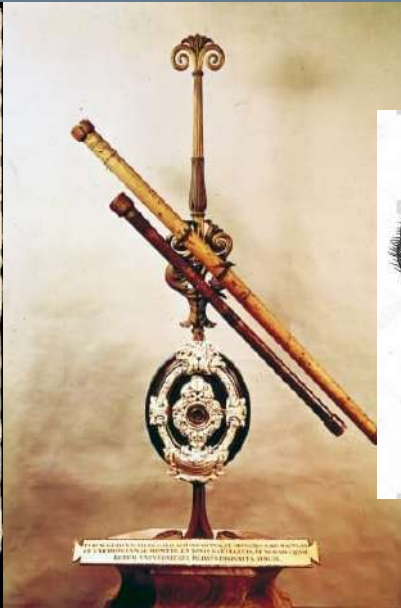
Ecole thématique USTV
Presqu'île de Giens
05-10 Octobre 2025



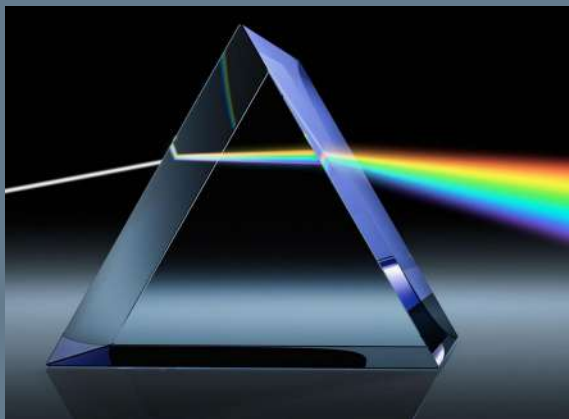
VERRE ET OPTIQUE, C'EST FANTASTIQUE !



1609 - Galilée



1665 - Micrographia, Robert Hooke



Le verre ouvre sur le monde et relie (fenêtres, fibres optiques, etc.)

AU COMMENCEMENT ÉTAIT LE VERRE

1^{er} matériau transparent fabriqué par l'Humanité

Verre → *vitrum*, transparent, qui fait voir



→ Verre et optique sont intimement liés

TRANSPARENCE RELATIVE

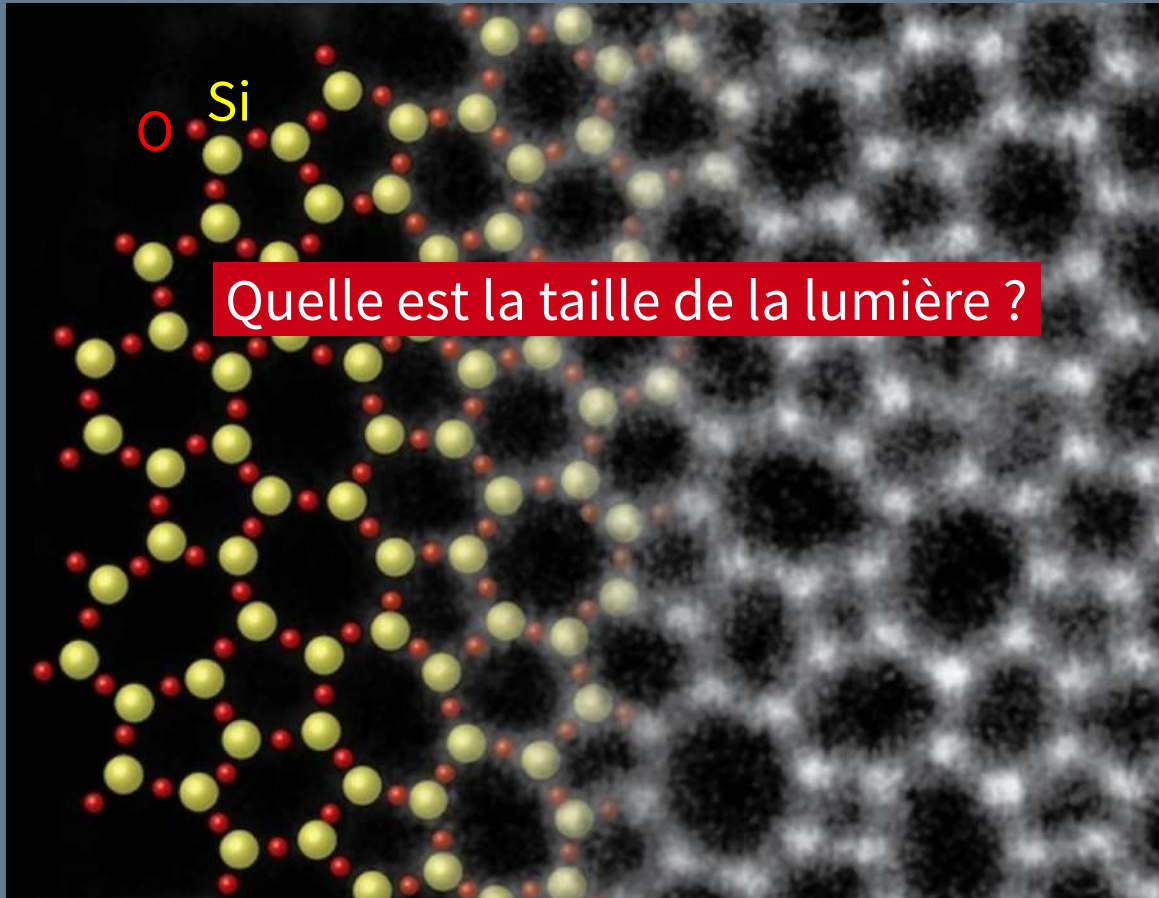


ambre

obsidienne

POURQUOI LE VERRE EST-IL TRANSPARENT ?

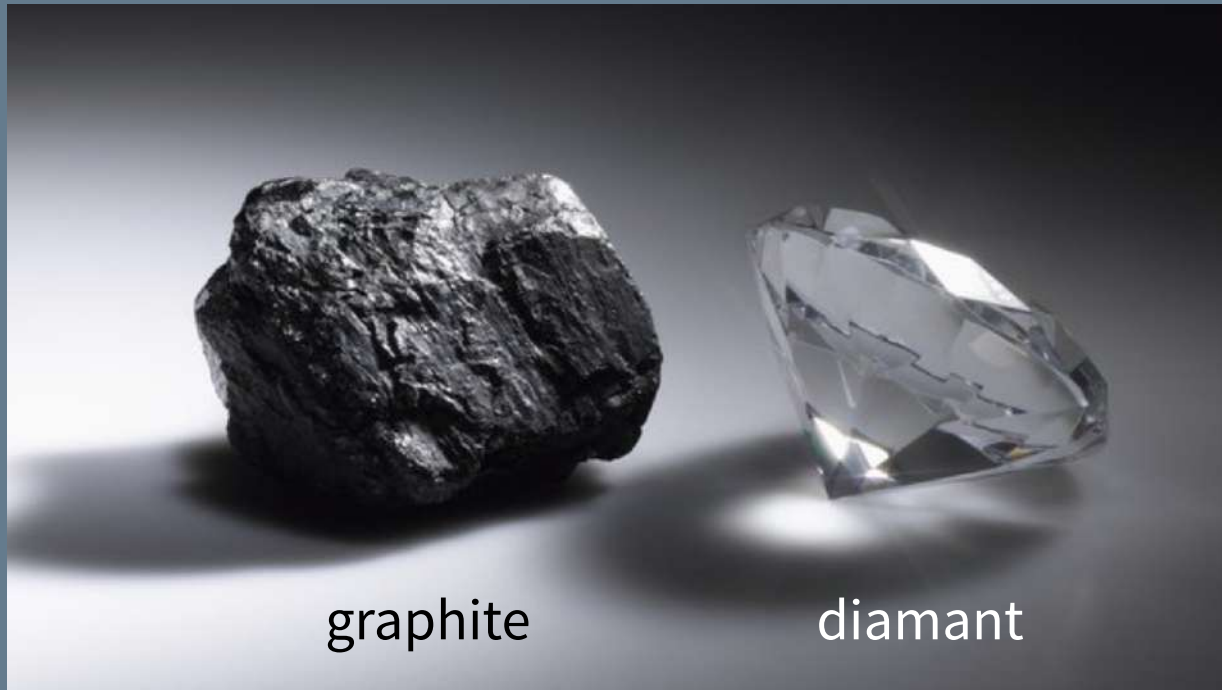
- Parce qu'il y a de la place entre les atomes ?



Distance Si-O : $1,6 \text{ \AA} = 0,16 \text{ nm}$

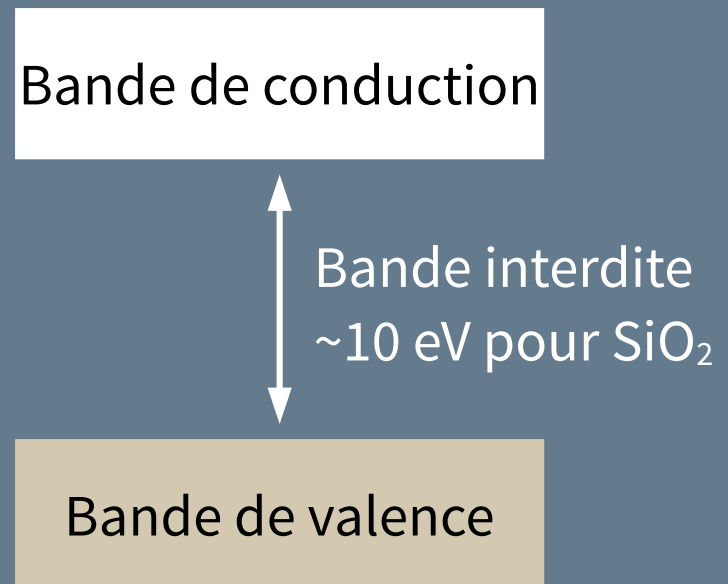
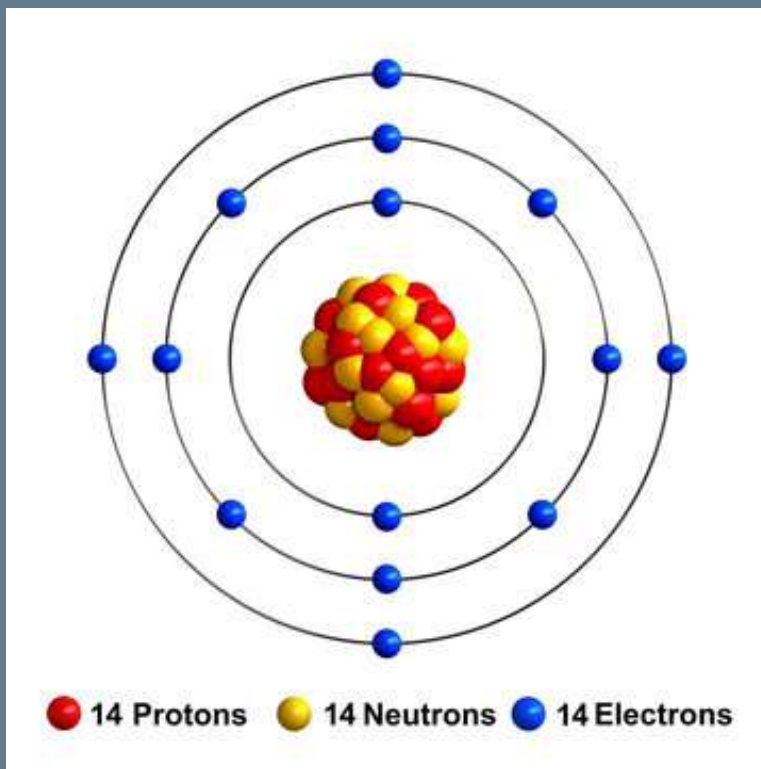
POURQUOI LE VERRE EST-IL TRANSPARENT ?

- Parce qu'il y a de la place entre les atomes ?
- À cause de la nature des atomes ?



POURQUOI LE VERRE EST-IL TRANSPARENT ?

- Parce qu'il y a de la place entre les atomes ?
- À cause de la nature des atomes ?
- À cause des électrons !



L'ORIGINE DU VERRE

« Selon la tradition, un navire portant des marchands de nitre vint y aborder, et, comme les marchands dispersés sur le rivage, préparaient leur repas et ne trouvaient pas de pierres pour rehausser leurs marmites, ils les remplacèrent par des mottes de nitre [natron] tirées de leur cargaison. Quand celles-ci furent embrasées, mêlées avec le sable du rivage, des ruisseaux translucides d'un liquide inconnu se mirent à couler et telle fut l'origine du verre. »



Pline l'ancien - Histoire naturelle, livre XXXV

En Phénicie, nitre = salpêtre = KNO_3 ,

Pline l'Ancien 23-79 ap JC

Origine du verre -3000 ans

- La vision se distingue des autres sens par le fait qu'elle permet d'atteindre la **couleur** des corps.
- Les corps contiennent du diaphane (issu de l'éther), « en puissance » dans l'obscurité ou lorsque l'œil est fermé, « actualisé » en présence de lumière ou lorsque l'œil est ouvert.
- Les couleurs résultent du degré d'actualisation.



LA RÉFRACTION

- Ptolémée (90-168) : mesures très précises des angles de réfraction
- Witelo (1220-1286) : l'angle réfracté dépend de la densité des milieux traversés

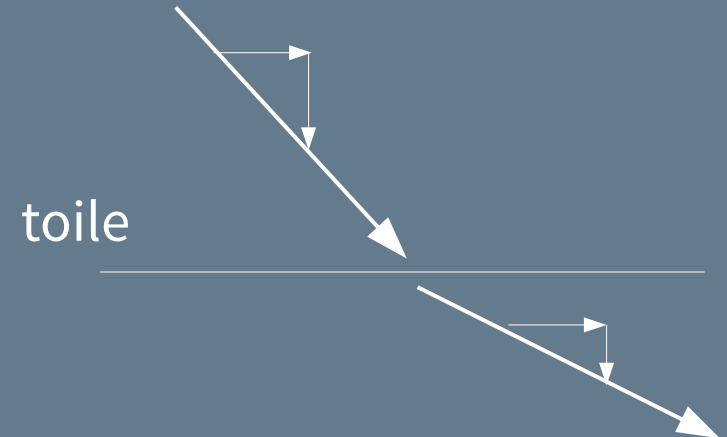
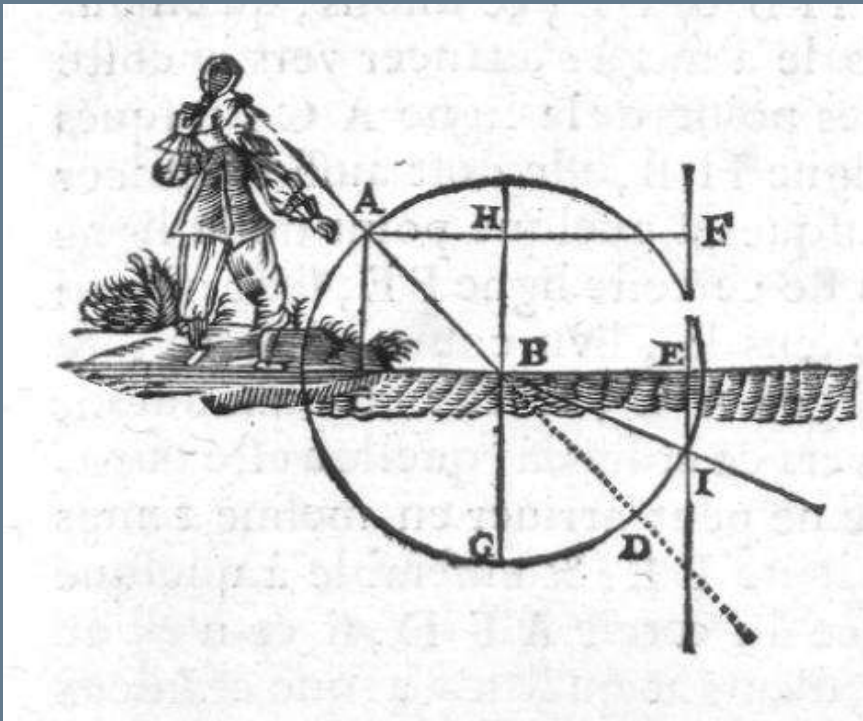
Incidence	Réfraction mesurée	Réfraction calculée ($n=1,5$)
10°	7°	6,65°
20°	13,5°	13,18°
40	25°	25,37°
60°	34,5°	35,26°
80°	42°	41,04°

Ptolémée, Livre V de l'Optique

RENÉ DESCARTES, LA DIOPTRIQUE (1637)

« Ce qui vous empêchera d'abord de trouver étrange que cette lumière puisse étendre ses rayons en un instant depuis le soleil jusqu'à nous »

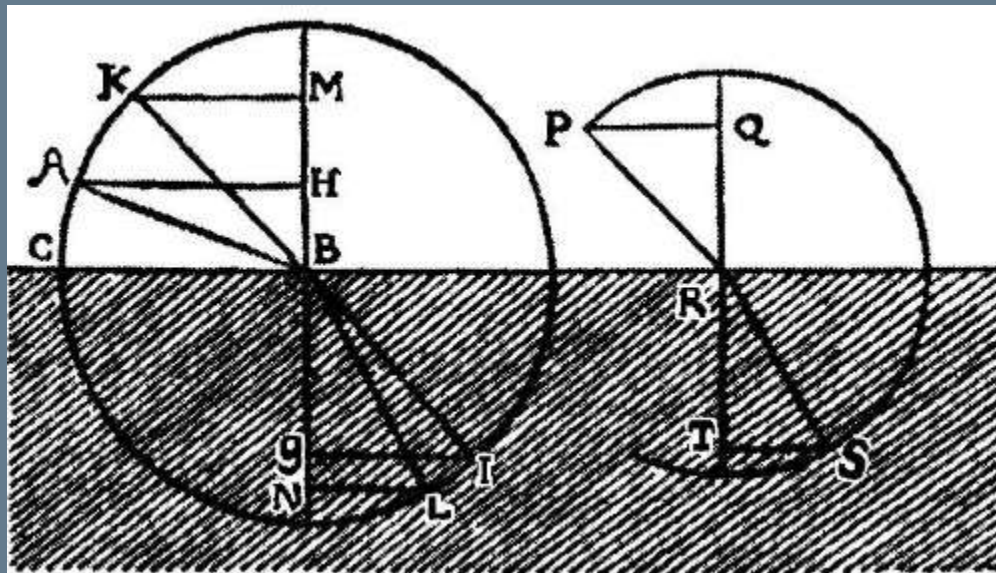
Analogie avec une balle traversant une toile pour expliquer le changement de milieu



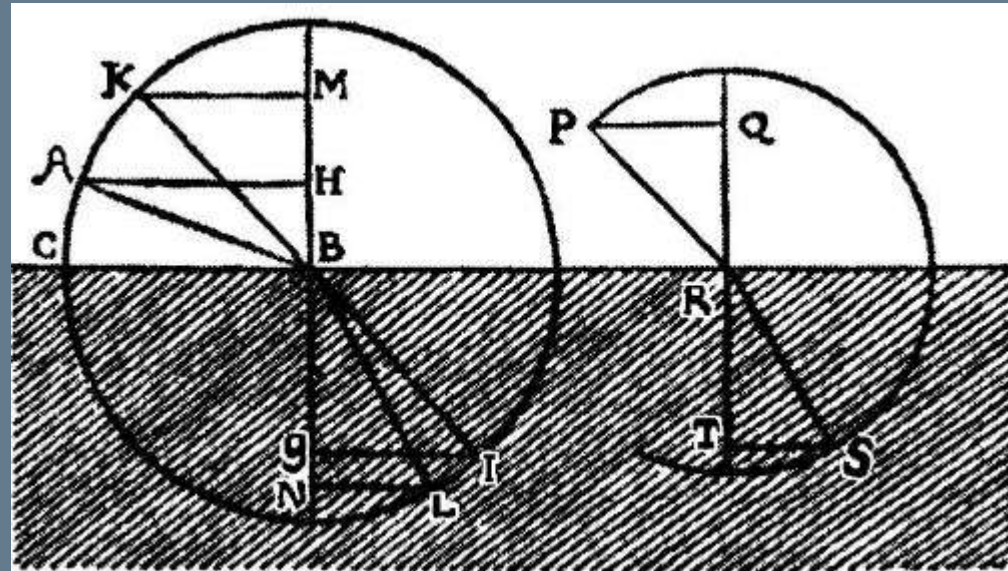
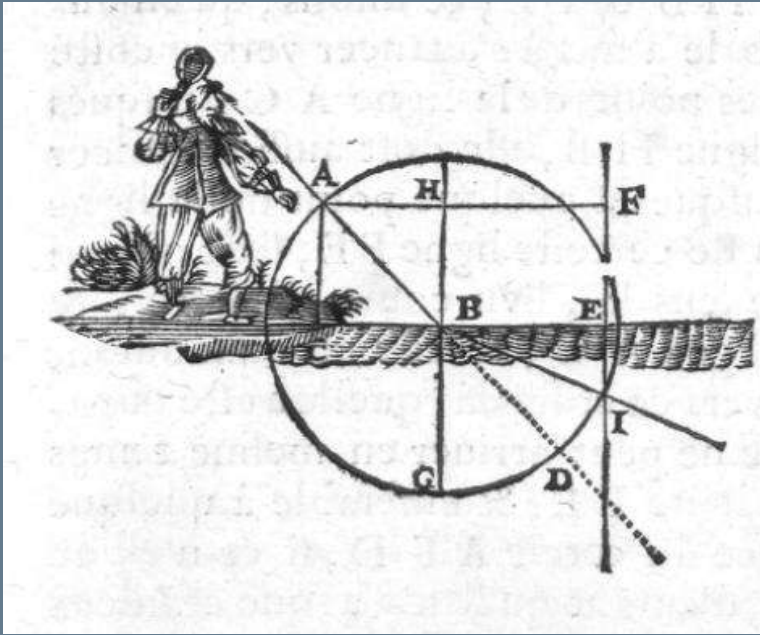
Au passage de la toile,
La vitesse perpendiculaire
diminue

RENÉ DESCARTES, LA DIOPTRIQUE (1637)

« ***Mais peut-être vous étonnerez-vous***, en faisant ces expériences, de trouver que les rayons de la lumière s'inclinent plus dans l'air que dans l'eau, sur les superficies où se fait leur réfraction ; et encore plus dans l'eau que dans le verre, ***tout au contraire d'une balle***, qui s'incline davantage dans l'eau que dans l'air, et ne peut aucunement passer dans le verre : car, par exemple, si c'est une balle qui, étant poussée dans l'air de *A* vers *B*, rencontre au point *B* la superficie de l'eau *CBE*, elle se détournera de *B* vers *V* ; et si c'est un rayon, il ira tout au contraire de *B* vers *I*. »



RENÉ DESCARTES, LA DIOPTRIQUE (1637)



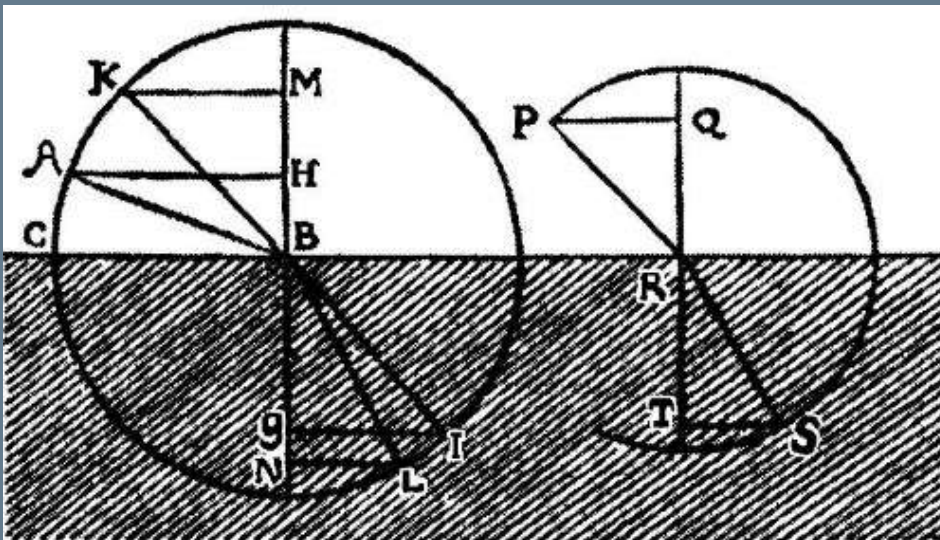
La lumière va plus vite dans le verre que dans l'air !

RENÉ DESCARTES, LA DIOPTRIQUE (1637)

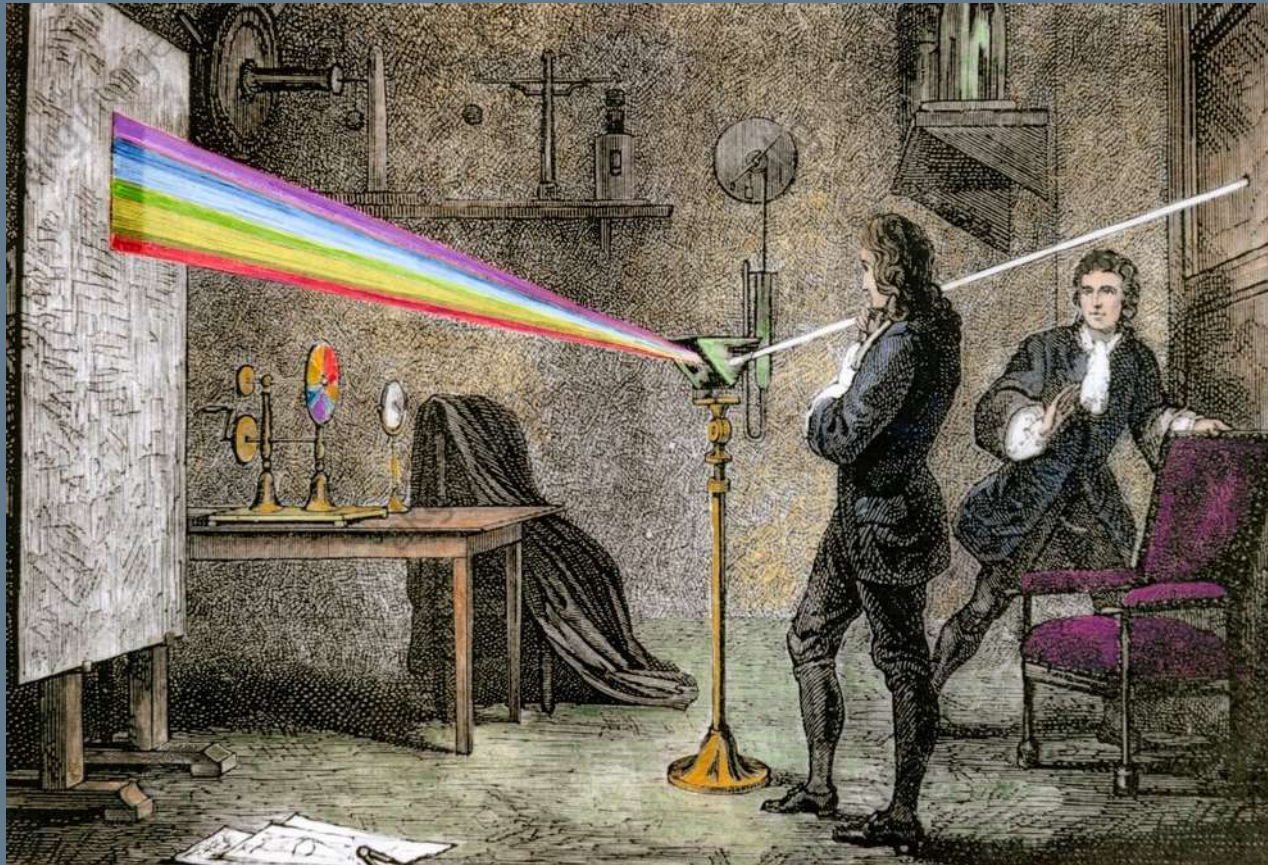
« Ce que vous cesserez toutefois de trouver étrange, si vous vous souvenez de la nature que j'ai attribuée à la lumière, quand j'ai dit qu'elle n'étoit autre chose qu'un certain mouvement ou une action reçue en une matière très subtile, qui remplit les pores des autres corps ; et que vous considériez que, - comme une balle perd davantage de son agitation en donnant contre un corps mou que contre un qui est dur, et qu'elle roule moins aisément sur un tapis que sur une table toute nue, ainsi l'action de cette matière subtile peut beaucoup plus être empêchée par les parties de l'air, qui étant comme molles et mal jointes ne lui font pas beaucoup de résistance, que par celles de l'eau qui lui en font davantage ; et encore plus par celles de l'eau que par celles du verre ou du cristal : en sorte que d'autant que **les petites parties d'un corps transparent sont plus dures et plus fermes, d'autant laissent-elles passer la lumière plus aisément, car cette lumière n'en doit pas chasser aucunes hors de leurs places, ainsi qu'une balle en doit chasser de celles de l'eau pour trouver passage parmi elles.** »

RENÉ DESCARTES, LA DIOPTRIQUE (1637), LA LOI DES SINUS

« [...] car la raison ou proportion qui est entre ces angles varie à toutes les diverses inclinations des rayons, au lieu que celle qui est entre les lignes AH et IG, ou semblables, demeure la même en toutes les réfractions qui sont causées par les mêmes corps. Comme, par exemple, s'il passe un rayon dans l'air de A vers B, qui, rencontrant au point B la superficie du verre CBR, se détourne vers I dans ce verre, et qu'il en vienne un autre de K vers B qui se détourne vers L, et un autre de P vers R qui se détourne vers S, il doit y avoir même proportion entre les lignes KM et LN, qu'entre AH et IG ; mais non pas la même entre les angles RBM et LBN, qu'entre ABH et IBG. »

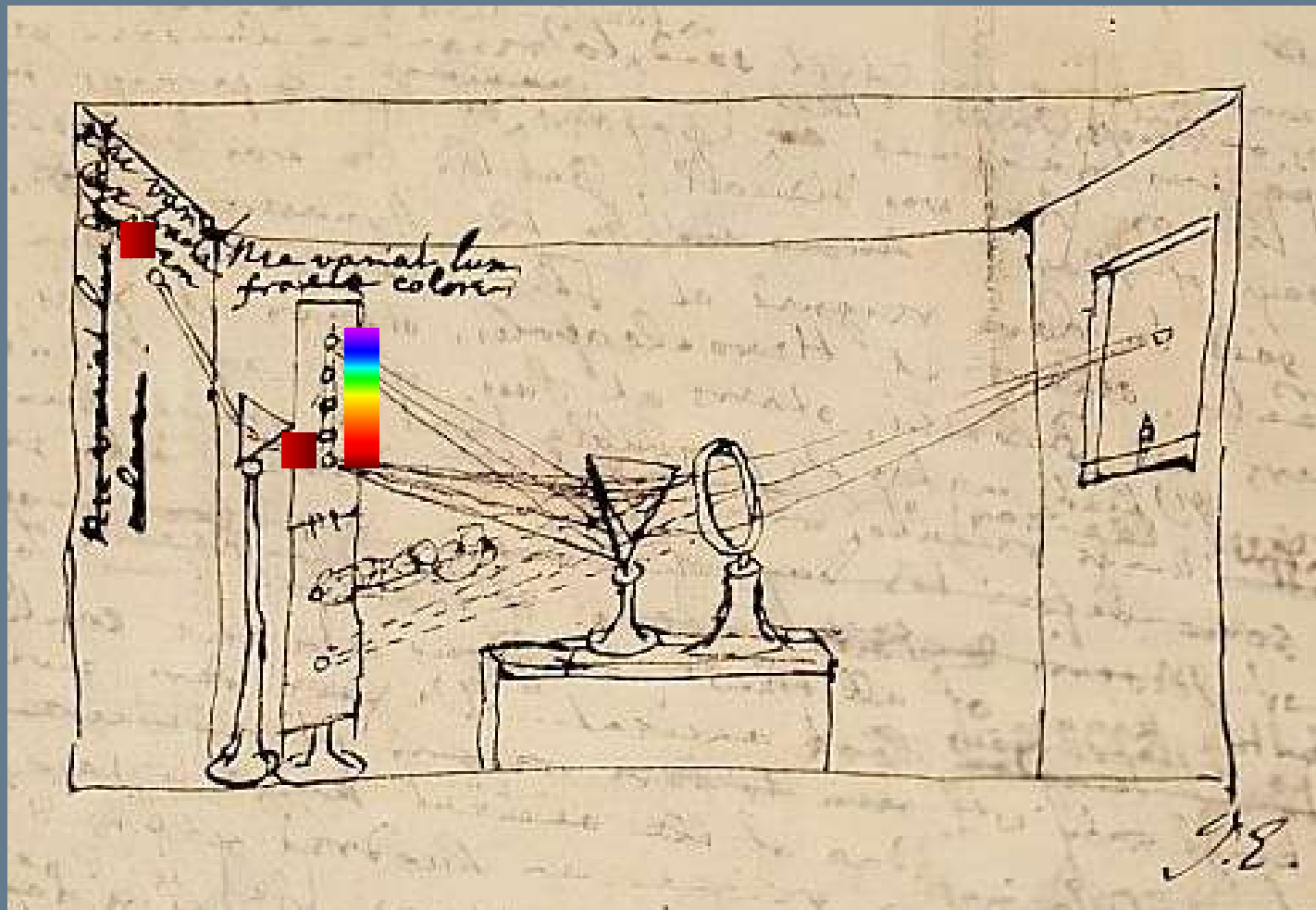


$$\frac{KM}{LN} = \frac{AH}{IG} = \frac{PQ}{TS} = C^{ste}$$



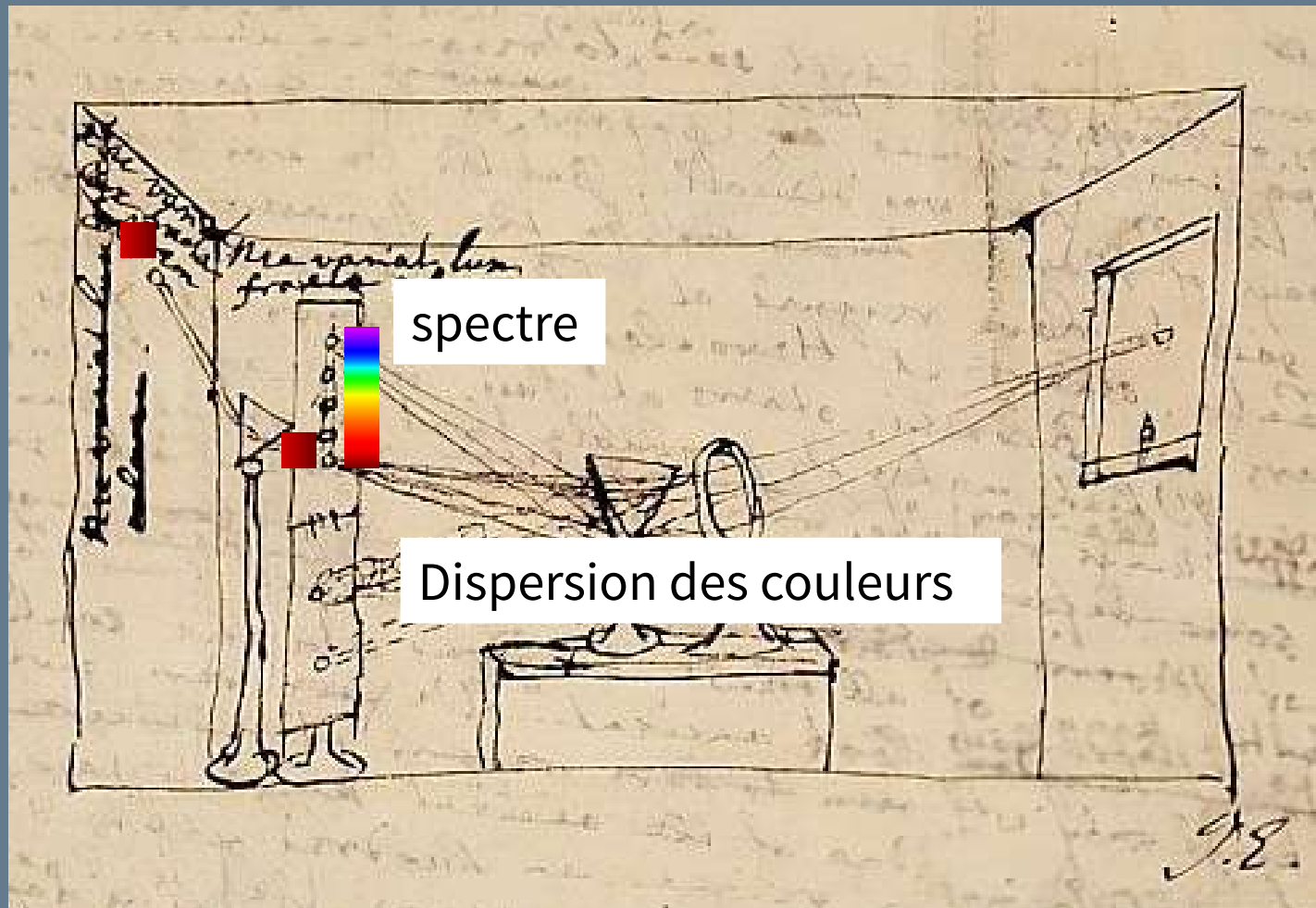
Expériences de Newton en 1666 (23 ans),
confiné à Woolsthorpe à cause de la Grande Peste

L'EXPERIMENTUM CRUCIS



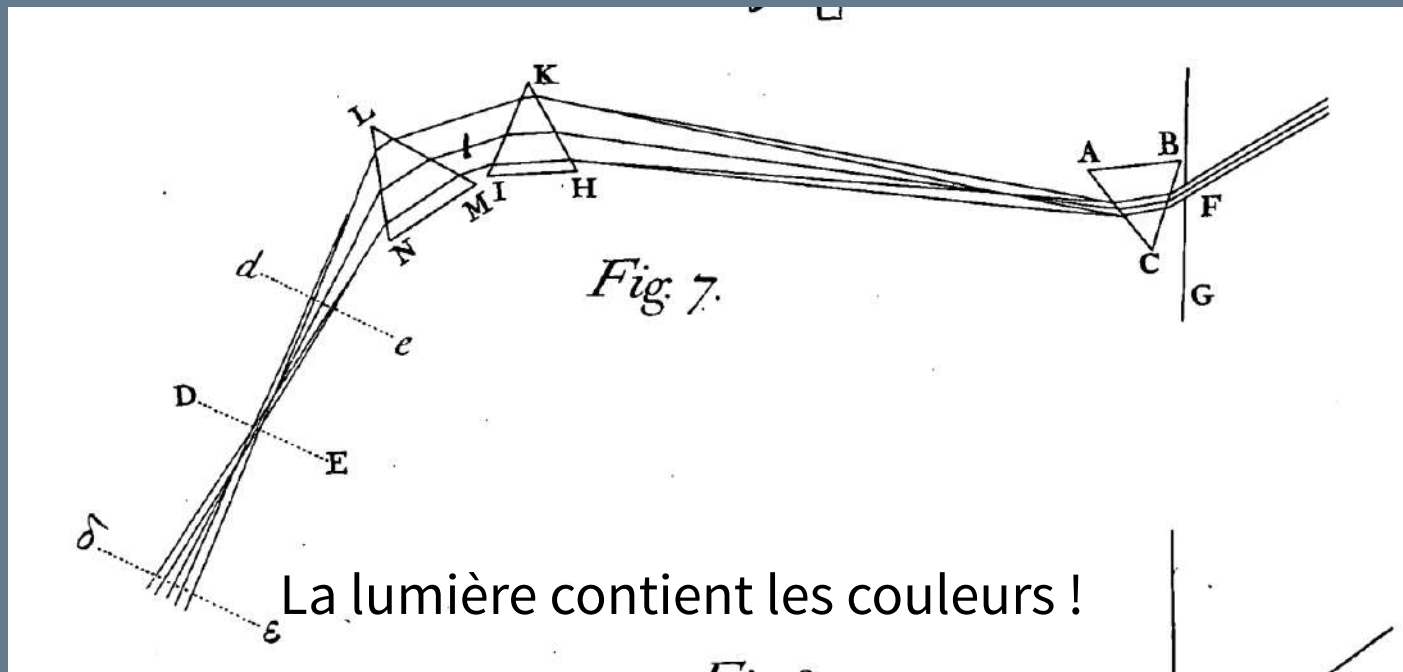
En utilisant deux prismes, I. Newton montre que la couleur ne dépend pas de la surface traversée comme le prétendait Descartes.

L'EXPERIMENTUM CRUCIS



1666 : 5 couleurs, 1672 : 7 couleurs, Parution de Optiks en 1704

RECOMPOSITION DU BLANC



Les couleurs d'Aristote

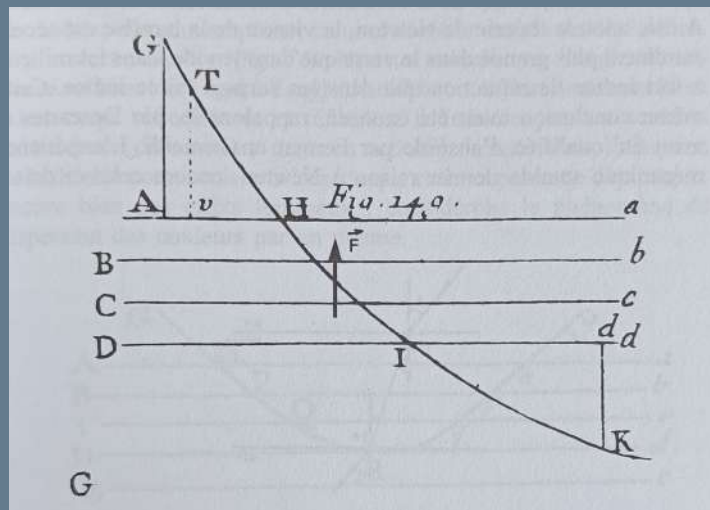


Le blanc est pur, les couleurs sont impures
Couleurs classées par luminosité, non par teinte

- Résultats présentés à la Royal Society qui ne les accepte pas (“lumière disséquée”, bleu + jaune = blanc).
- Newton développe alors sa théorie de la gravitation universelle, présentée 10 ans plus tard à la Royal Society.
- Newton va alors appliquer les forces à la lumière.
- La lumière est formée de corpuscules, qui se propagent à une vitesse énorme.
- Ces corpuscules décrivent des droites (rayons) en traversant un milieu quelconque, leurs trajectoires sont dues à la seule inertie (soumis à aucune force, ne subissent aucun choc, ce qui implique une matière “poreuse”).

ISAAC NEWTON

- Les corpuscules lumineux subissent à leur arrivée sur une surface de séparation de deux milieux (très peu avant, très peu après) l'effet d'une force dirigée perpendiculairement à la surface.
- Paradoxe : la lumière va plus vite dans le verre que dans l'air. La force réfringente accélère les corpuscules qui voyagent ensuite dans un corps très poreux (trajet rectiligne, inertie, pas de chocs)
- La même force permet de réfracter et réfléchir la lumière.



VITESSE DE LA LUMIÈRE DANS LE VERRE

Première mesure de la vitesse de la lumière dans « l'éther »
par Ole Christensen Römer en 1676 :
elle met 22 minutes pour traverser le diamètre de l'orbite terrestre,
soit 212 000 km/s

Plus rapide

René Descartes
(1596-1650)

Isaac Newton
(1643-1727)

Plus lente

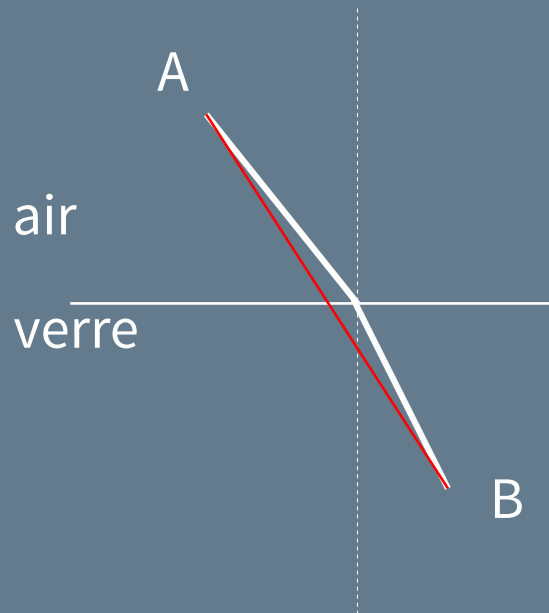
Pierre de Fermat
(1607-1665)

Christian Huygens
(1629 - 1695)



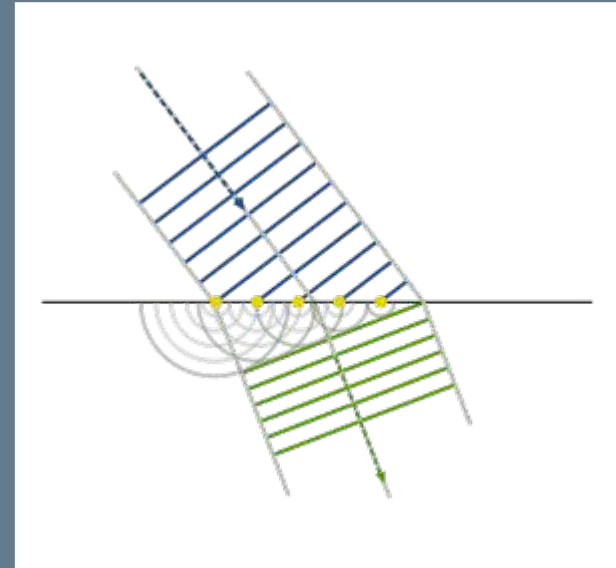
LA LUMIÈRE VA PLUS LENTEMENT DANS LE VERRE

Principe de Fermat



Minimisation de la durée
du parcours $A \rightarrow B$

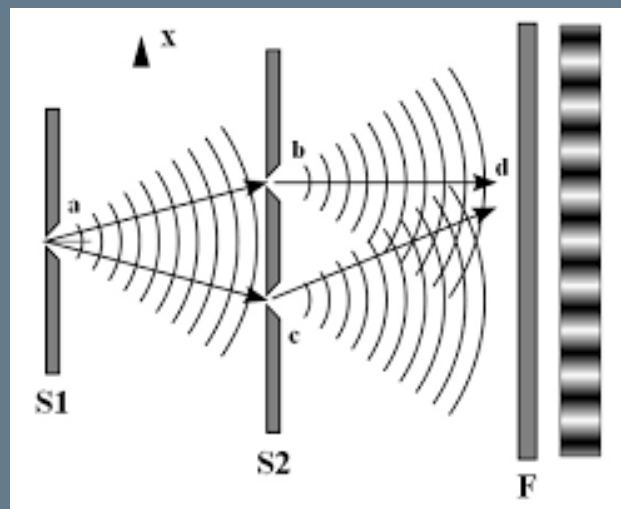
Christian Huygens



Émission par des
sources secondaires

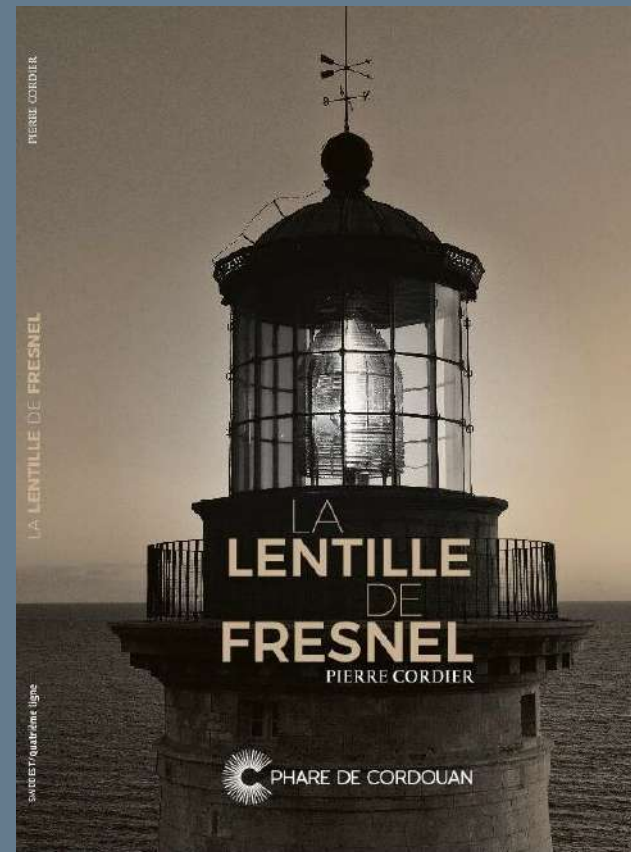
LA NATURE ONDULATOIRE DE LA LUMIÈRE

- Leonhard Euler (1707-1783) : une couleur est associée à une **fréquence** de vibration, plus faible pour le rouge puisqu'il se déplace plus rapidement (moins dévié).
- Thomas Young (1773-1829) : composition des ondes = interférence. Sa théorie ondulatoire permet d'expliquer la présence des franges d'interférences d'un écran percé de deux trous et d'en déduire les longueurs d'onde des couleurs ($0,7 \mu\text{m}$ pour le rouge, $0,42 \mu\text{m}$ pour le violet).



AUGUSTIN FRESNEL (1788-1827)

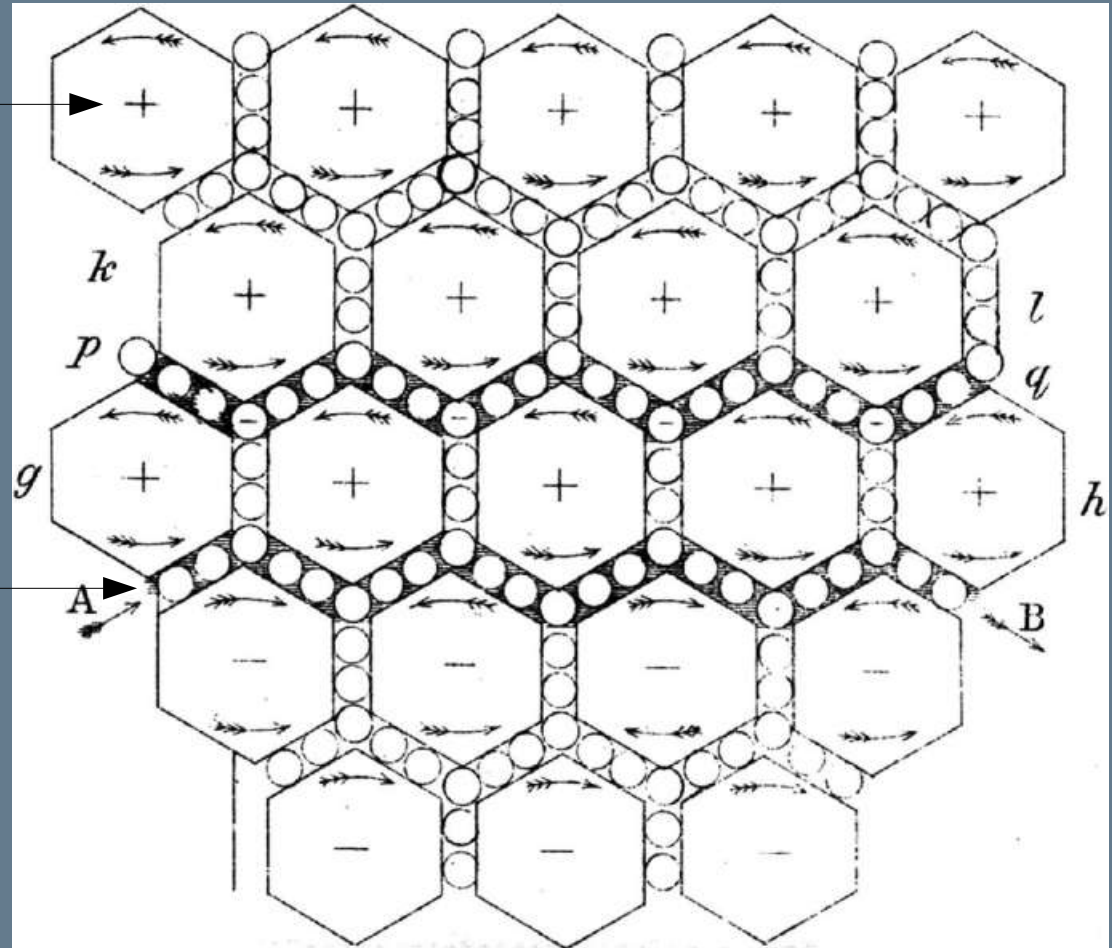
- Comprend que la lumière est une onde transversale.
- Lentilles de Fresnel (1822)



JAMES CLERCK MAXWELL (1831-1879)

“tourbillons”
= champ
magnétique

“pignons”
= courant
électrique



LES ÉQUATIONS DE MAXWELL

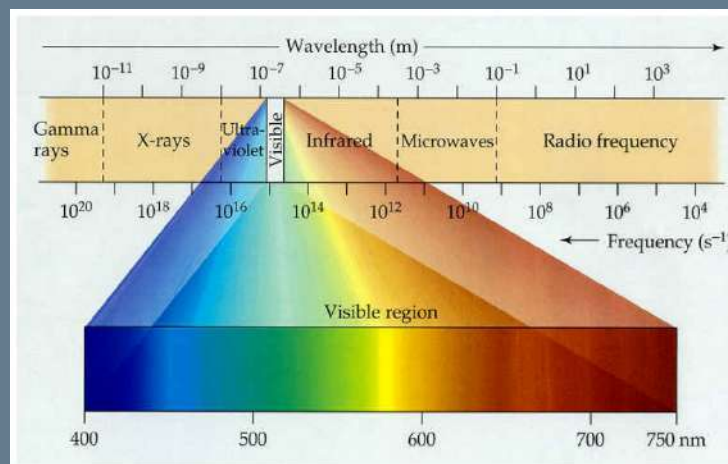
$$\operatorname{div}(\vec{E}) = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad \vec{\operatorname{rot}}(\vec{E}) = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

(Maxwell-Gauss) (Maxwell-Faraday)

$$\operatorname{div}(\vec{B}) = 0 \quad \vec{\operatorname{rot}}(\vec{B}) = \mu_0 \vec{J} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

(Maxwell-Flux) (Maxwell-Ampère)

→ Onde électromagnétique, qui a les mêmes propriétés que la lumière.
La lumière est une partie des ondes électromagnétiques !

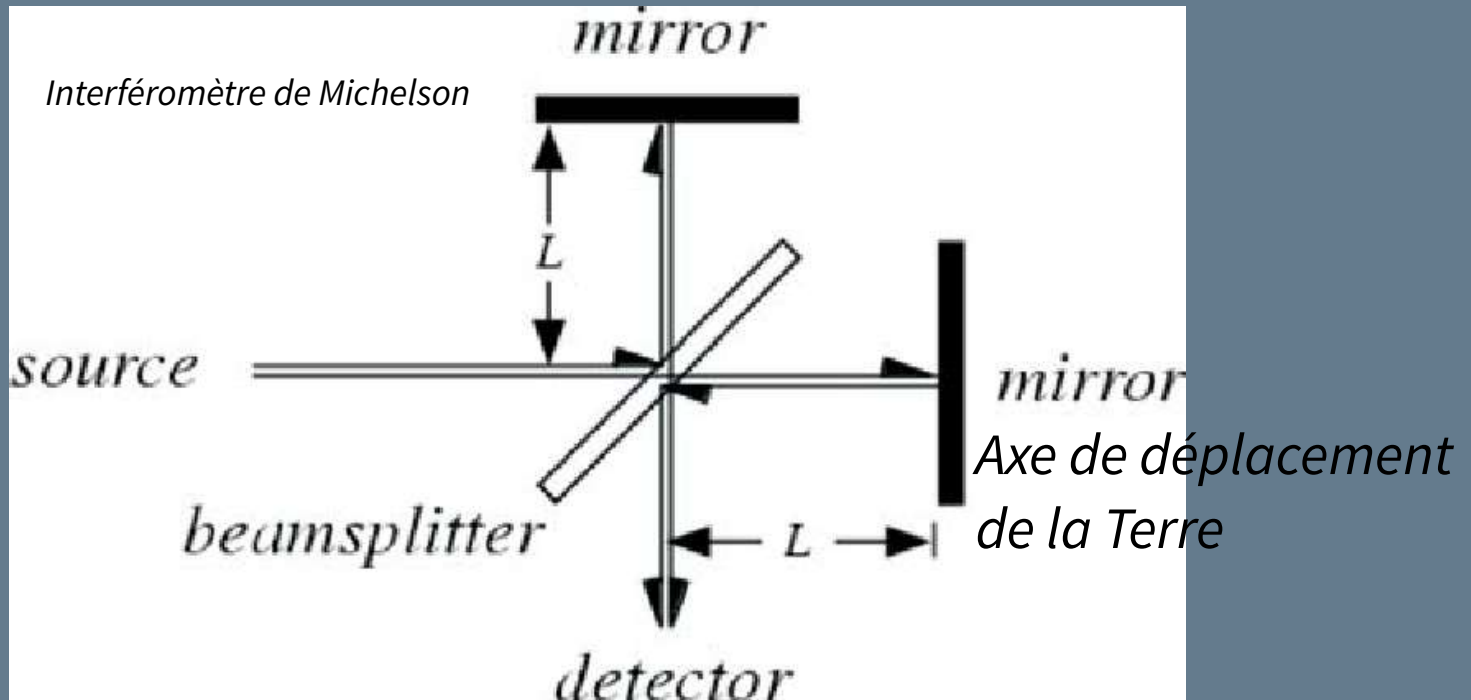


« La physique est définitivement constituée dans ses concepts fondamentaux ; tout ce qu'elle peut désormais apporter, c'est la détermination précise de quelques décimales supplémentaires. Il y a bien deux petits problèmes : celui du résultat négatif de l'expérience de Michelson et celui du corps noir mais ils seront rapidement résolus et n'altèrent en rien notre confiance. »

Lord Kelvin, fin du XIXe siècle

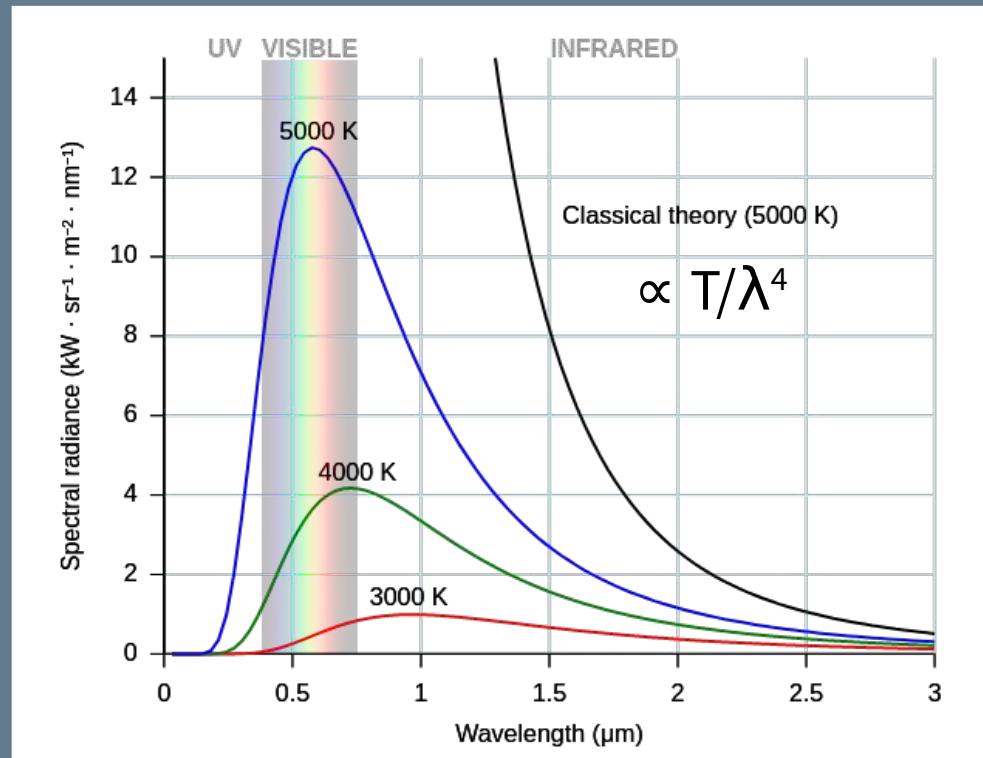
L'EXPÉRIENCE DE MICHELSON ET MORLEY

Étoile



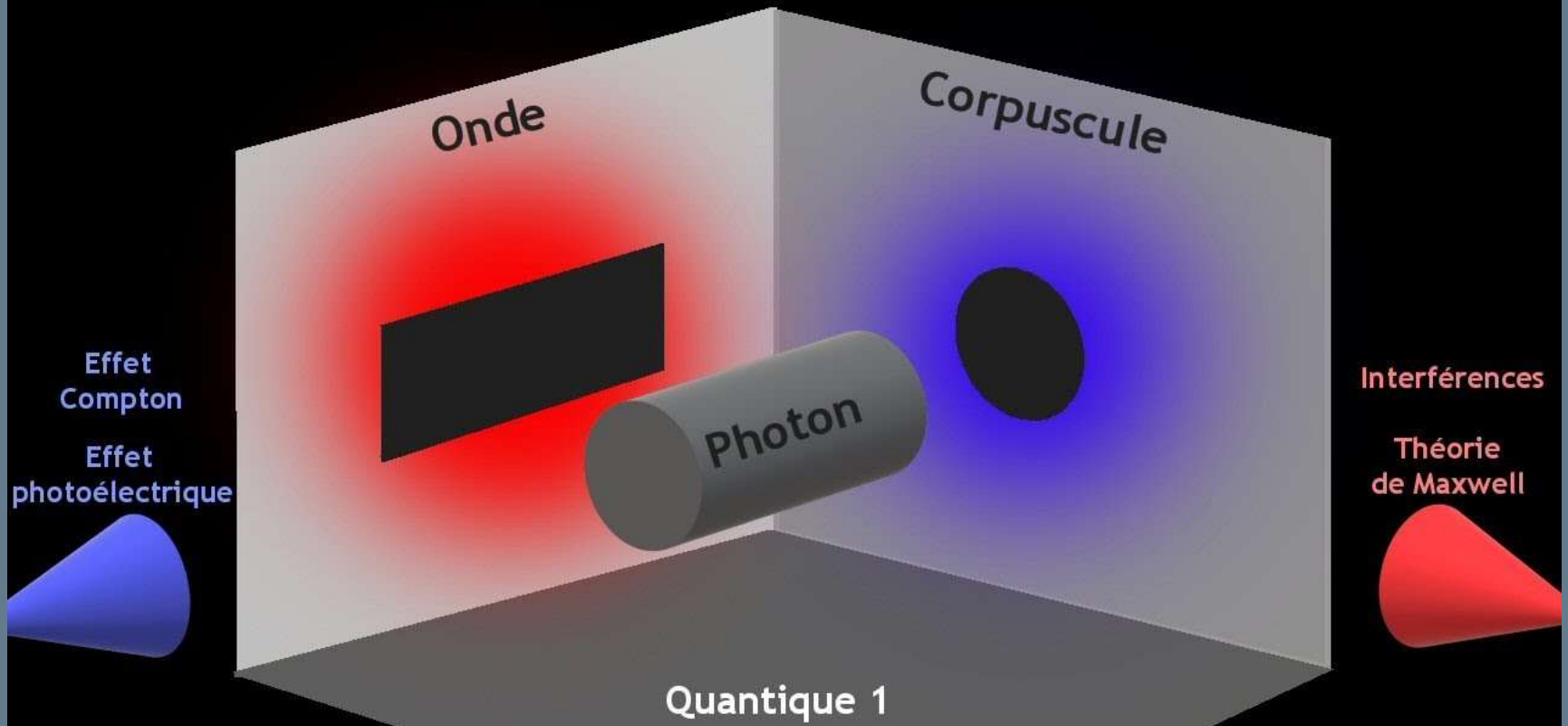
- Aucun « vent d'éther » n'est détecté et la vitesse de la lumière est constante malgré la vitesse de déplacement de la Terre (30 km/s).
- Albert Einstein postule que l'éther n'existe pas et que la vitesse de la lumière est invariante → Théorie de la relativité.

LA CATASTROPHE UV



- 1900 : Max Planck utilise un artifice de calcul consistant à introduire des éléments discrets d'énergie.
- 1905 : Albert Einstein donne une signification physique à ces quantas pour expliquer l'effet photo-électrique.
- 1923 : les quantas sont appelés *photons*.

Dualité onde-corpuscule : Le photon



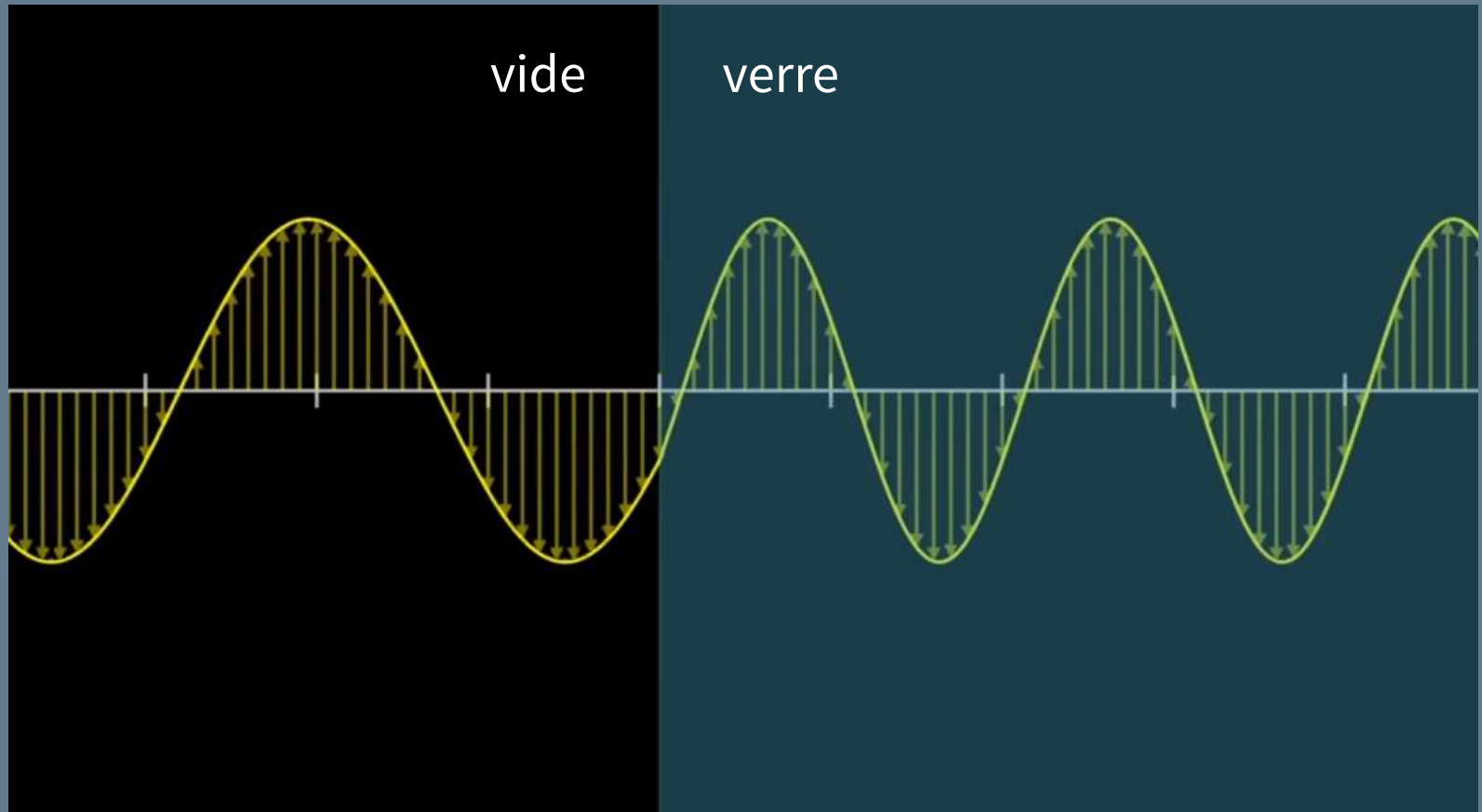
QUI EST MODIFIÉ : λ OU ν ?

$$\lambda_{\text{vide}} \nu_{\text{vide}} = c \quad \text{et} \quad \lambda_{\text{verre}} \nu_{\text{verre}} = \frac{c}{n}$$

$$\rightarrow n \lambda_{\text{verre}} \nu_{\text{verre}} = \lambda_{\text{vide}} \nu_{\text{vide}}$$

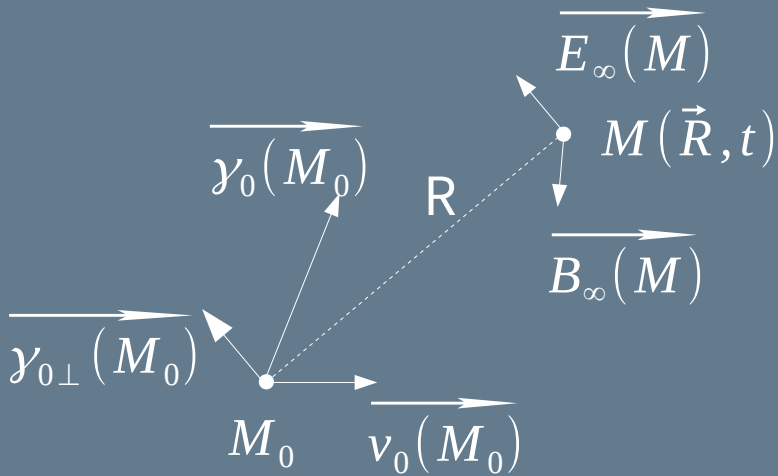
Qui « prend » le n ?

QUI EST MODIFIÉ : λ OU ν ?



$$\lambda_{\text{verre}} = \frac{\lambda_{\text{vide}}}{n} \quad \nu_{\text{verre}} = \nu_{\text{vide}}$$

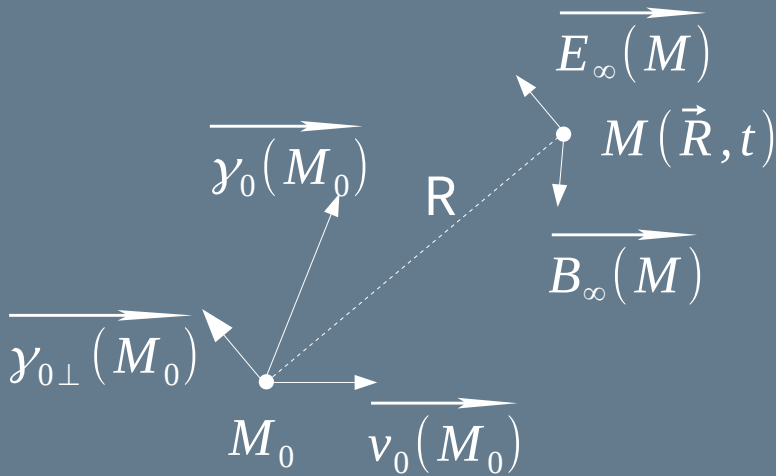
CHAMP ÉLECTROMAGNÉTIQUE RAYONNÉ PAR UNE CHARGE



$$\vec{E}_\infty(M) = \frac{-q}{4\pi\epsilon_0 c^2 R} \vec{\gamma}_{0\perp}(M_0)$$

Particules non relativistes

CHAMP ÉLECTROMAGNÉTIQUE RAYONNÉ PAR UNE CHARGE



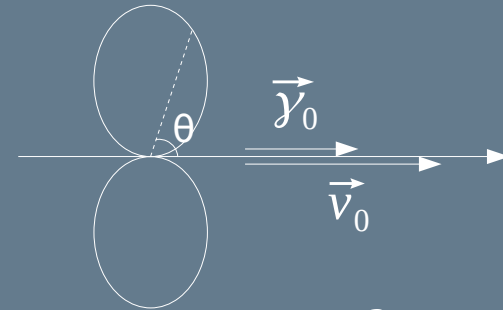
$$\vec{E}_{\infty}(M) = \frac{-q}{4\pi\epsilon_0 c^2 R} \vec{\gamma}_{0\perp}(M_0)$$

Particules non relativistes

Puissance totale rayonnée :

$$P = \frac{2}{3} \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 c^3} \dot{\gamma}_0^2$$

Si $v = c^{\text{ste}}$, $P = 0$



$$\frac{dP}{d\Omega}(\theta) = \frac{\epsilon_0 q^2}{(4\pi\epsilon_0)^2 c^3} \dot{\gamma}_0^2 \sin^2 \theta$$

$\gamma = \ddot{z} \rightarrow$ définir z

RAYONNEMENT PAR UN OSCILLATEUR HARMONIQUE

La charge q se déplace comme un oscillateur harmonique :

$$z(t) = z_0 \cos(\omega_0 t - \phi_0) \quad \omega_0 \text{ fréquence propre angulaire}$$

→ champs EM crée :

$$\overrightarrow{E}(\vec{R}, t) = \frac{-q}{4\pi\epsilon_0 c^2 R} \vec{y}_{\perp} \left(t - \frac{R}{c} \right)$$

Même fréquence ω_0 pour le champ rayonné et la charge en mouvement

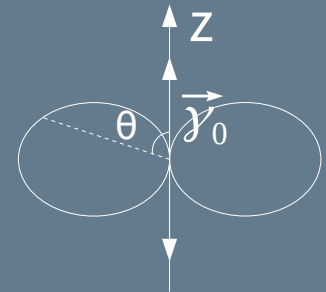
RAYONNEMENT PAR UN OSCILLATEUR HARMONIQUE

Puissance rayonnée :

$$\langle P \rangle = \frac{2}{3} \frac{e^2 \omega_0^2}{4 \pi \epsilon_0 m c^3} E_{\text{oscillateur}}$$

$\langle P \rangle \propto 1/m$ → rôle prépondérant des électrons

$\langle P \rangle \propto \omega_0$ → Puissance émise à une seule fréquence « de Dirac »



L'oscillateur perd l'énergie qu'il émet par rayonnement :

$$E_{\text{oscillateur}}(t) = E_0 e^{(-t/\tau)}, \quad \tau = \frac{6 \pi \epsilon_0 m c^3}{e^2 \omega_0^2}$$

τ : durée de vie de l'oscillateur (ou vie moyenne de l'oscillateur)

Pour la raie bleue de l'hydrogène ($\lambda=486,1$ nm),

$\tau=10$ ns, soit 6.10^6 période du mouvement

RAYONNEMENT ÉMIS PAR UN OSCILLATEUR HARMONIQUE AMORTI (ATOME)

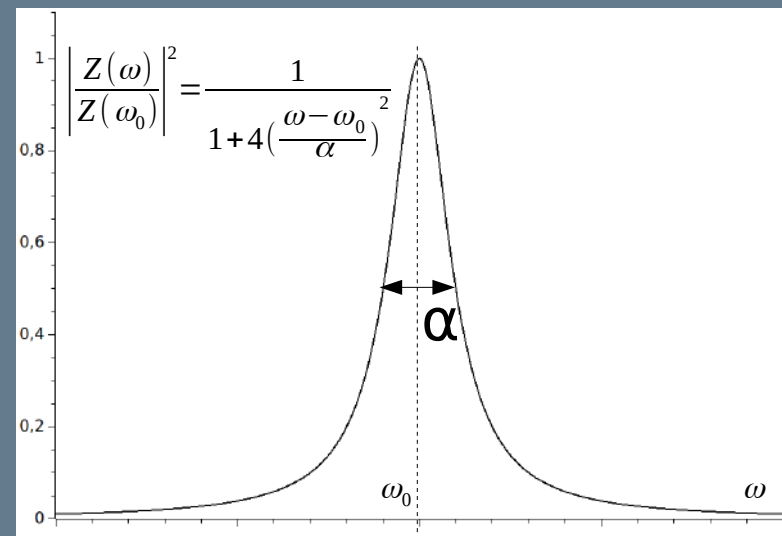
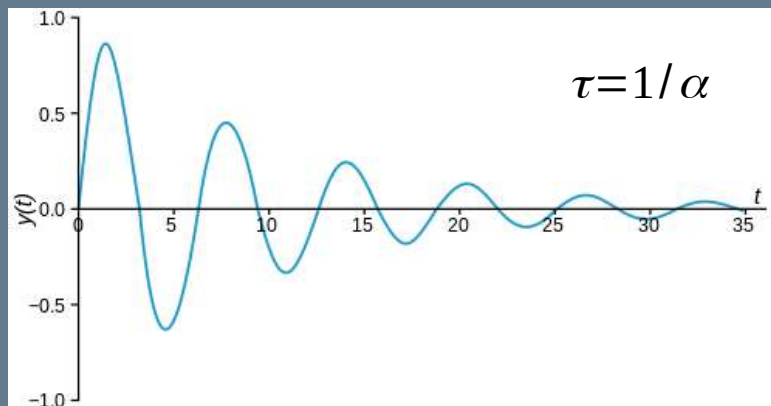
$$f = -kz - m \alpha \dot{z}$$

Force de liaison
qui attache l'électron

Force de frottement
(perte d'énergie par rayonnement)

$$z(t) = z_0 Y(t) e^{-t/2\tau} \cos(\omega_0 t - \phi) = \int_{-\infty}^{+\infty} Z(\omega) e^{i\omega t} \frac{d\omega}{2\pi}$$

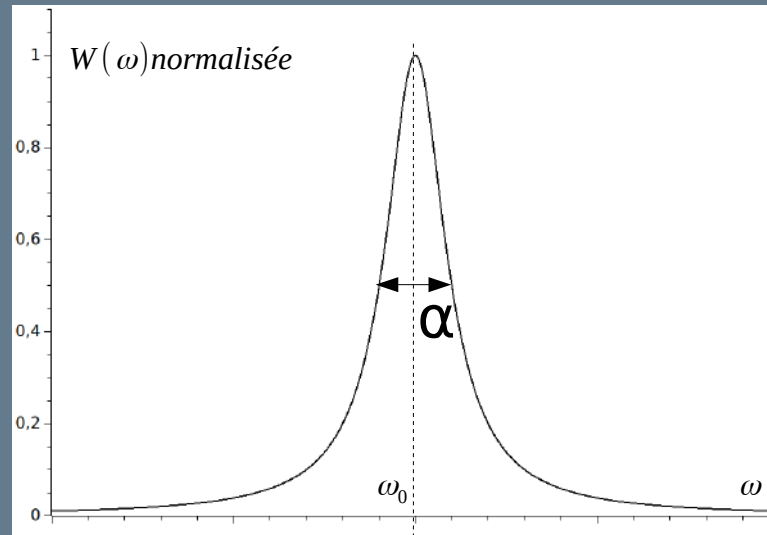
Fonction pseudo-périodique



RAYONNEMENT ÉMIS PAR UN OSCILLATEUR HARMONIQUE AMORTI (ATOME)

Puissance électromagnétique émise :

$$W_{EM}^{émise} = \frac{e^2}{6\pi\epsilon_0 c^3} \int_0^{+\infty} |Z(\omega)|^2 \omega^4 d\omega \approx \int_0^{+\infty} |Z(\omega)|^2 \omega_0^4 d\omega = \int_0^{+\infty} W(\omega) d\omega$$



$$\frac{\alpha}{\omega_0} \sim 10^{-8}$$

$\alpha = \text{bande passante}, \Delta\omega = \alpha \text{ donc } \Delta\omega \cdot \tau = 1$

Distribution spectrale répartie suivant une Lorentzienne
(Largeur naturelle d'une raie spectrale)

COMMENT LE RAYONNEMENT EM AGIT SUR LES ATOMES

Onde plane incidente :

l'électron effectue des oscillations amorties + oscillations forcées

$$\vec{r} = \frac{q \vec{E}_0}{m_0} \frac{\cos(\omega t - \delta)}{[(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + \alpha^2 \omega^2]^{1/2}}$$

$$\tan \delta \sim \frac{\alpha}{2(\omega_0 - \omega)}$$

quand $\omega = \omega_0$, $\tan \delta = \pi/2$

L'onde EM émise à la même fréquence que celle incidente.

L'onde EM émise est déphasée de $\pi/2$ par rapport à l'onde incidente.

COMMENT AGIT UN CHAMPS EM INCIDENT

Moment dipolaire total : $\vec{d} = \vec{d}_1 + \vec{d}_2 = N \alpha \epsilon_0 \vec{E}$

Alignement des
moments dipolaires

Moment dipolaire induit

Induction électrique : $\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{d} = \epsilon \epsilon_0 \vec{E}$ avec $\epsilon = 1 + N \alpha$

→ propagation d'une onde avec une vitesse $v = v_{phase} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}} = \frac{c}{n}$
(ici $\mu = 1$)

$$n = \sqrt{\epsilon} = \sqrt{1 + N \alpha} \approx 1 + \frac{N \alpha}{2} \quad (n \sim 1)$$

INDICE OPTIQUE IMAGINAIRE

Sous l'effet d'une onde EM incidente complexe, chaque oscillateur acquiert un moment dipolaire :

$$\vec{p} = \alpha \epsilon \vec{E}_0 e^{-i(kz - \omega t)}$$

$$\rightarrow \alpha = \frac{q^2}{m_0 \epsilon_0} \frac{e^{i\delta}}{[(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + \gamma^2 \omega^2]^{1/2}}$$

$$\alpha \text{ est imaginaire} \rightarrow n = 1 + \frac{N \alpha}{2} = n_R + i n_I$$

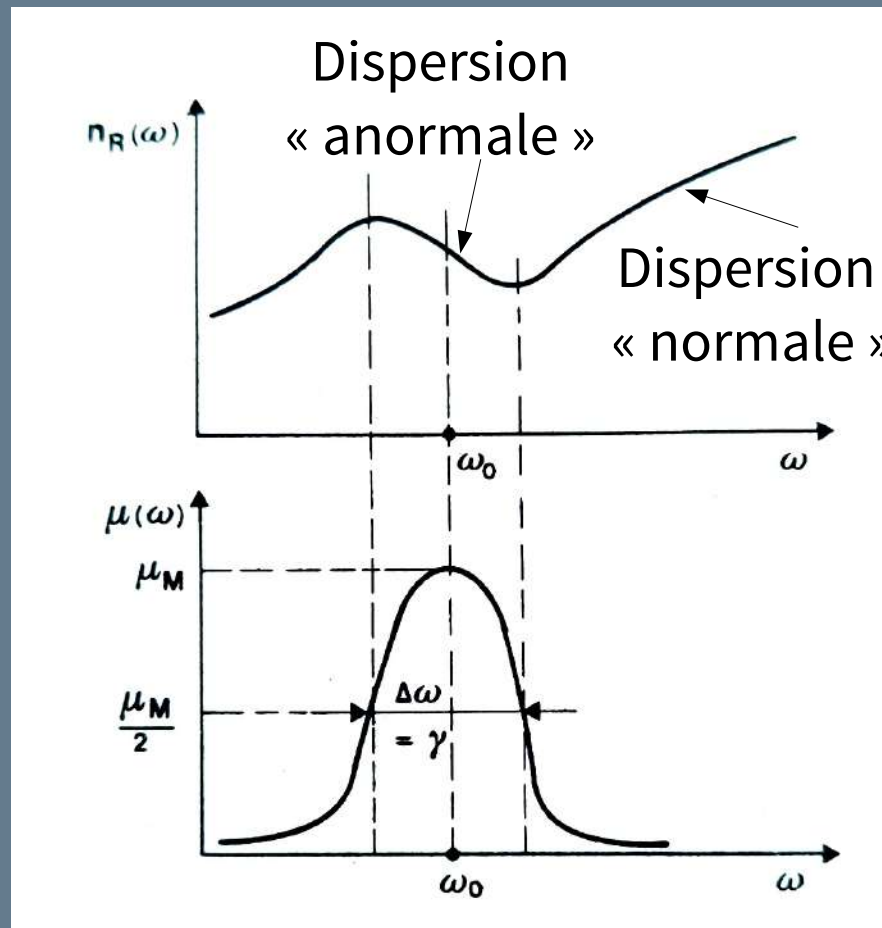
$$k = \frac{\omega}{c} n = \frac{\omega}{c} (n_R + i n_I) \rightarrow \vec{E} = \vec{E}_0 e^{-i(kz - \omega t)} = \underbrace{\vec{E}_0 e^{-n_I \frac{\omega}{c} z}}_{\text{amortissement}} e^{i(n_R \frac{\omega}{c} z - \omega t)}$$

n_I apparaît dans la partie « amortissement »

INDICE RÉEL ET ABSORPTION

coefficient d'absorption

$$n_R(\omega) = 1 + \frac{Nq^2}{2m_0\epsilon_0} \frac{\omega_0^2 - \omega^2}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \gamma^2\omega^2} \quad \mu(\omega) = \frac{2\omega}{c} n_I(\omega) = \frac{Nq^2}{m_0c\epsilon_0} \frac{\gamma\omega^2}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \gamma^2\omega^2}$$

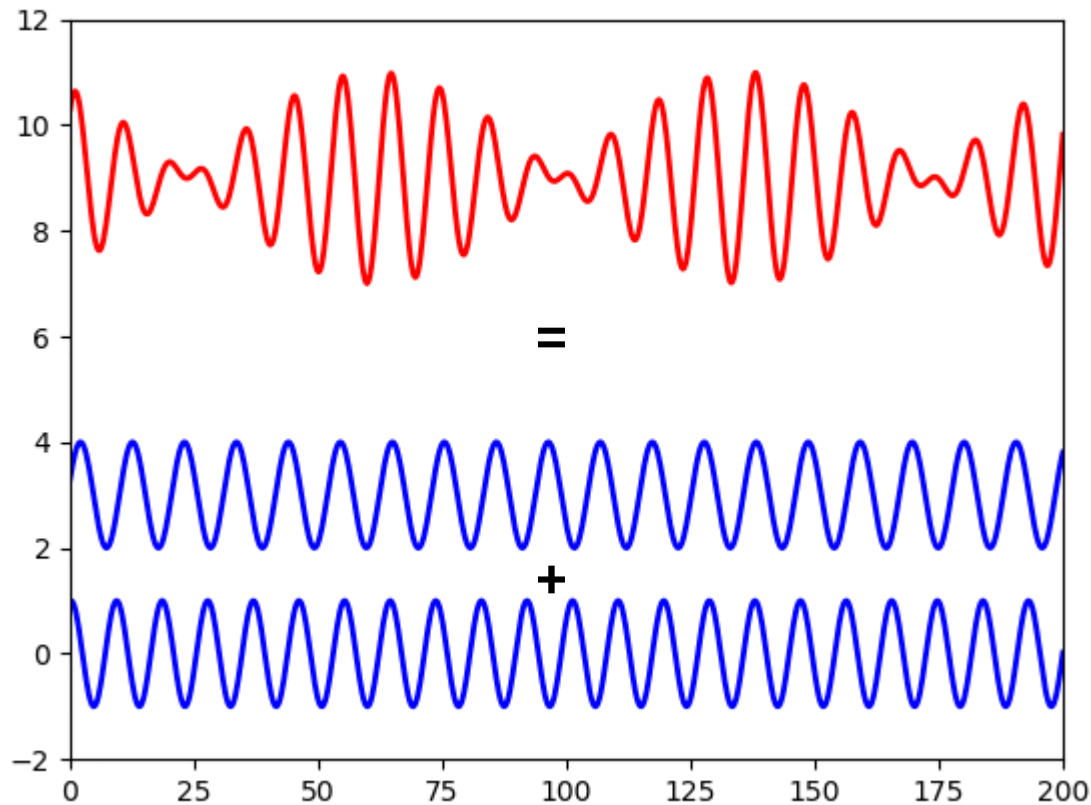


$$n_R \Leftrightarrow n_I$$



Relations de Kramers-Kronig

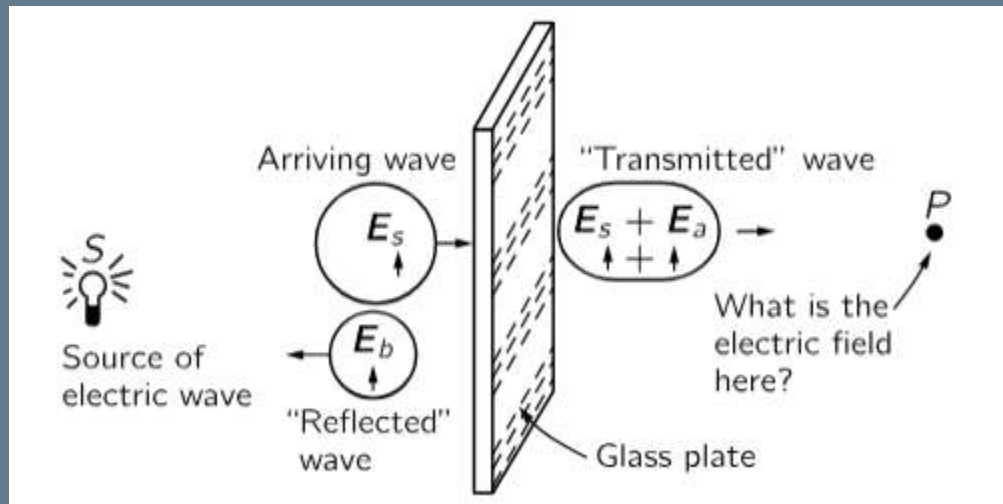
VITESSE DE GROUPE



$$v = v_{\text{groupe}} = \left(\frac{d\omega}{dk} \right)_{k=k_0}$$

$$v = v_{\text{phase}} = \frac{\omega}{k}$$

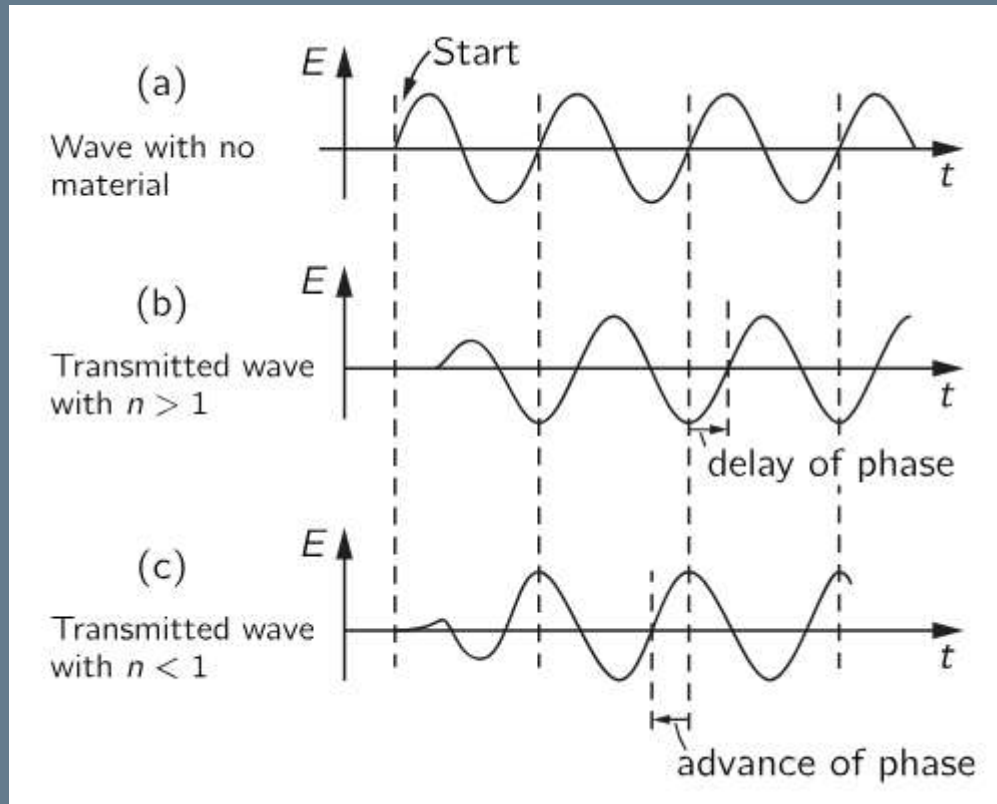
LA VITESSE DE LA LUMIÈRE DANS LE VERRE SELON RICHARD FEYNMAN



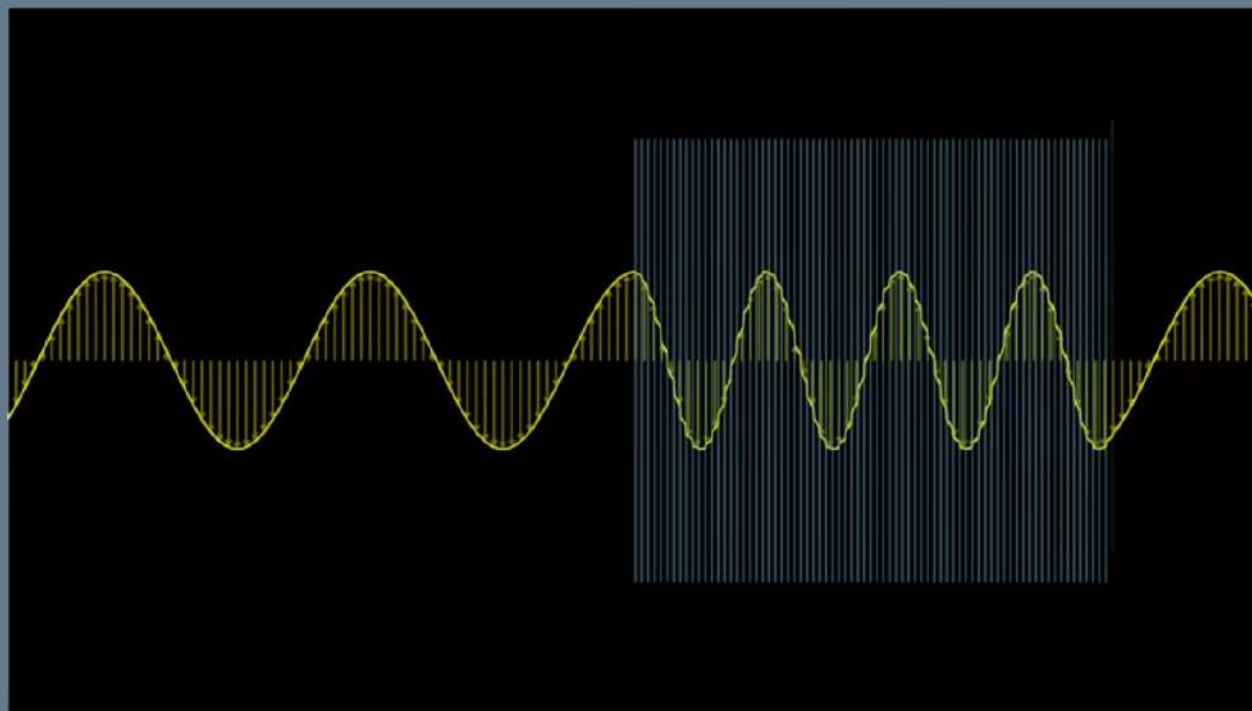
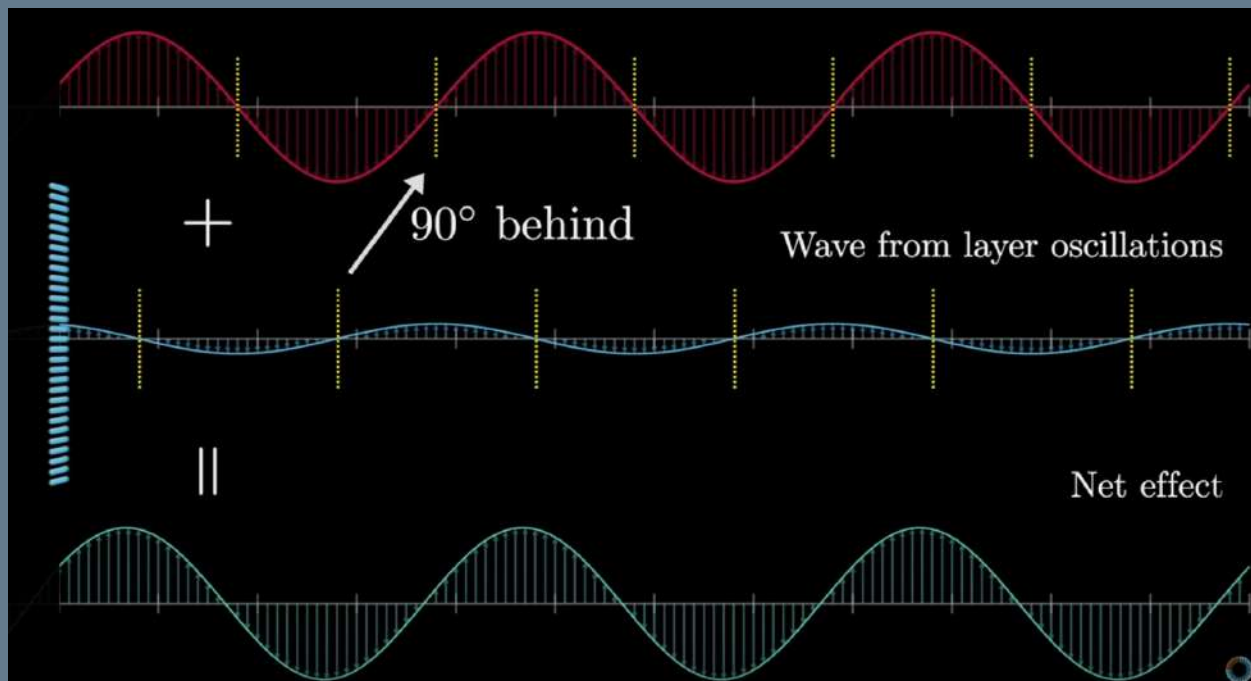
$$E_s = E_0 e^{i\omega(t-z/c)}.$$

$$E_{\text{after plate}} = \underbrace{E_0 e^{i\omega(t-z/c)}}_{E_s} - \underbrace{\frac{i\omega(n-1)\Delta z}{c} E_0 e^{i\omega(t-z/c)}}_{E_a}.$$

LA VITESSE DE LA LUMIÈRE DANS LE VERRE SELON RICHARD FEYNMAN

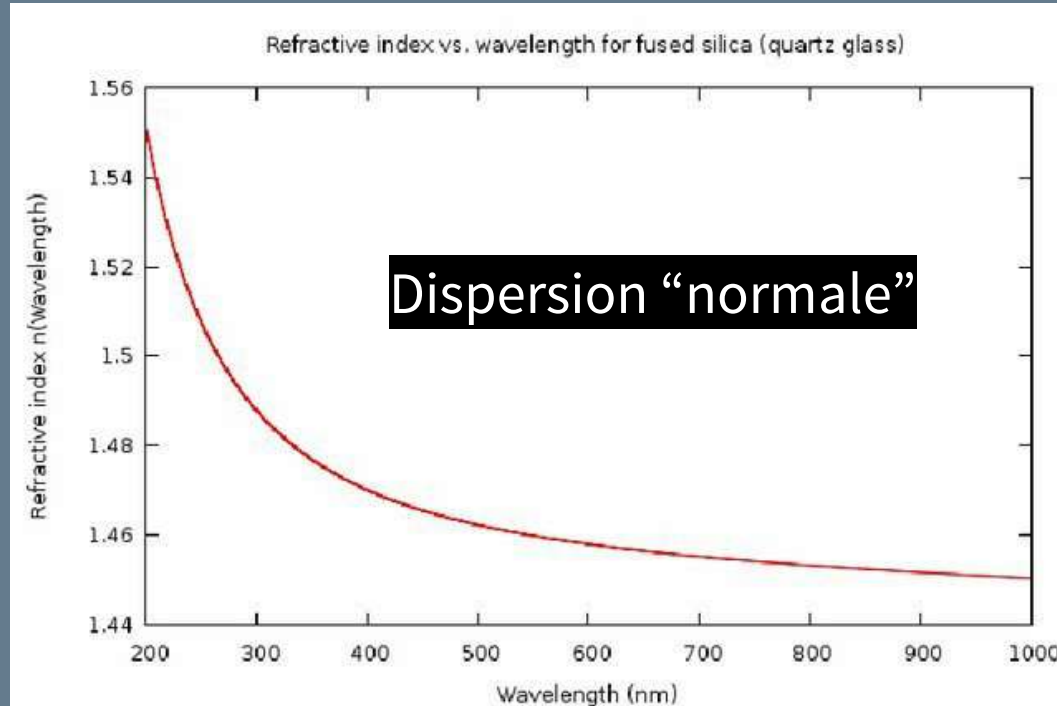


Lumière dans le verre =
onde incidente « source »
+
onde émise par les dipôles (avec un déphasage de $\pi/2$)



<https://www.youtube.com/watch?v=KTzGBJPuJwM>

DISPERSION DE L'INDICE OPTIQUE



L'indice de réfraction dépend de la longueur d'onde

→ arc-en-ciel après le prisme

→ dispersion chromatique d'une impulsion polychromatique

(le laser est monochromatique)

FORMULE DE SELLMEIER

Formulation générale :
$$n^2(\lambda) = 1 + \sum_j \frac{A_j \lambda^2}{\lambda^2 - B_j}$$

Pour la silice :

$$n^2(\lambda) = 1 + \frac{0,6961663 \lambda^2}{\lambda^2 - 0,0684043^2} + \frac{0,4079426 \lambda^2}{\lambda^2 - 0,1162414^2} + \frac{0,8974794 \lambda^2}{\lambda^2 - 9,896161^2}$$

I. H. Malitson, "Interspecimen comparison of the refractive index of fused silica", J. Opt. Soc. Am. 55 (10), 1205 (1965)

RefractiveIndex.INFO

Refractive index database

[nk database](#) | [n₂ database](#)

Shelf

MAIN - simple inorganic materials

Book

SiO2 (Silicon dioxide, Silica, Quartz)

Page

Malitson 1965: n 0.21–6.7 μm

Optical constants of SiO₂ (Silicon dioxide, Silica, Quartz)

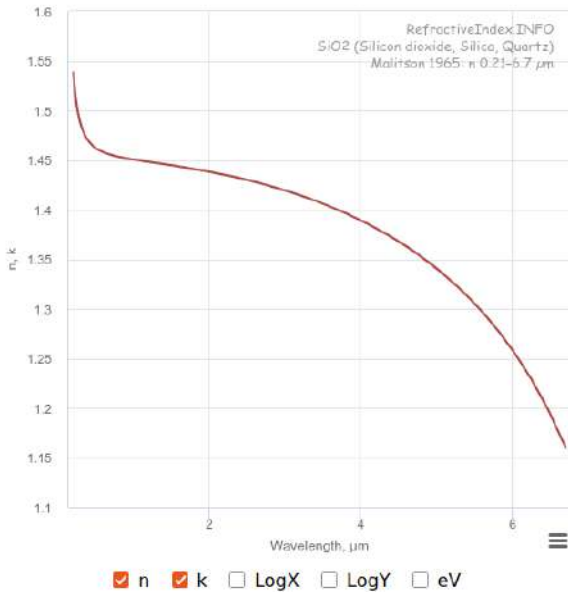
Malitson 1965: n 0.21–6.7 μm

Wavelength: 0.5876 μm (0.21–6.7)

Complex refractive index (n+ik)

Refractive index

n = 1.4585



Derived optical constants

Abbe number

V_d = 67.82

Abbe diagram

Chromatic dispersion

dn/dλ = -0.035209 μm⁻¹

Group index

n_g = 1.4792

Group velocity dispersion

GVD = 57.540 fs²/mm

D = -313.91 ps/(nm km)

Dispersion formula

$$n^2 - 1 = \frac{0.6961663\lambda^2}{\lambda^2 - 0.0684043^2} + \frac{0.4079426\lambda^2}{\lambda^2 - 0.1162414^2} + \frac{0.8974794\lambda^2}{\lambda^2 - 9.896161^2}$$

Conditions

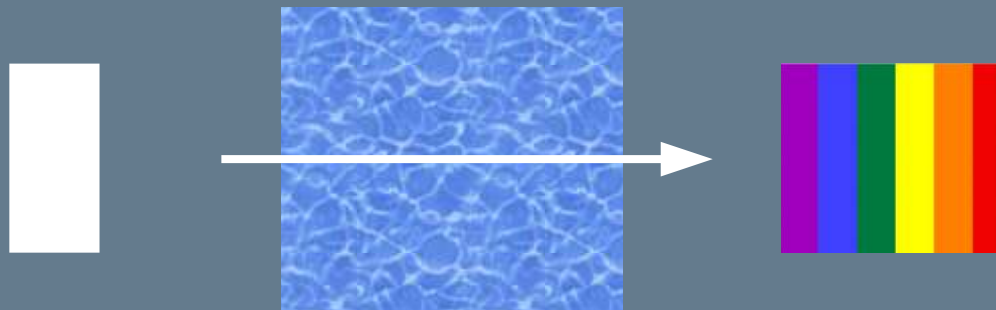
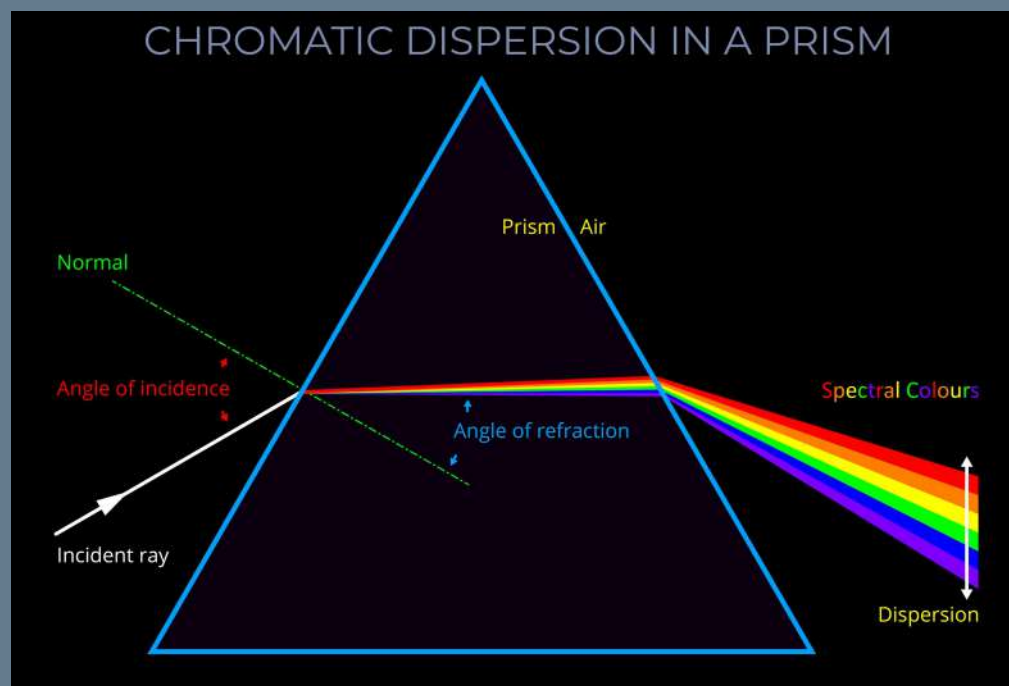
temperature: 293

Comments

Fused silica, 20 °C

References

- 1) I. H. Malitson, Interspecimen comparison of the refractive index of fused silica, *J. Opt. Soc. Am.* **55**, 1205-1208 (1965)
2) C. Z. Tan, Determination of refractive index of silica glass for infrared wavelengths by IR spectroscopy *J. Non-Cryst. Solids* **223**, 158-163 (1998)
* Sellmeier formula is reported in Ref. 1 for the 0.21–3.71 μm wavelength range. Ref. 2 verifies the validity of the formula up to 6.7 μm.

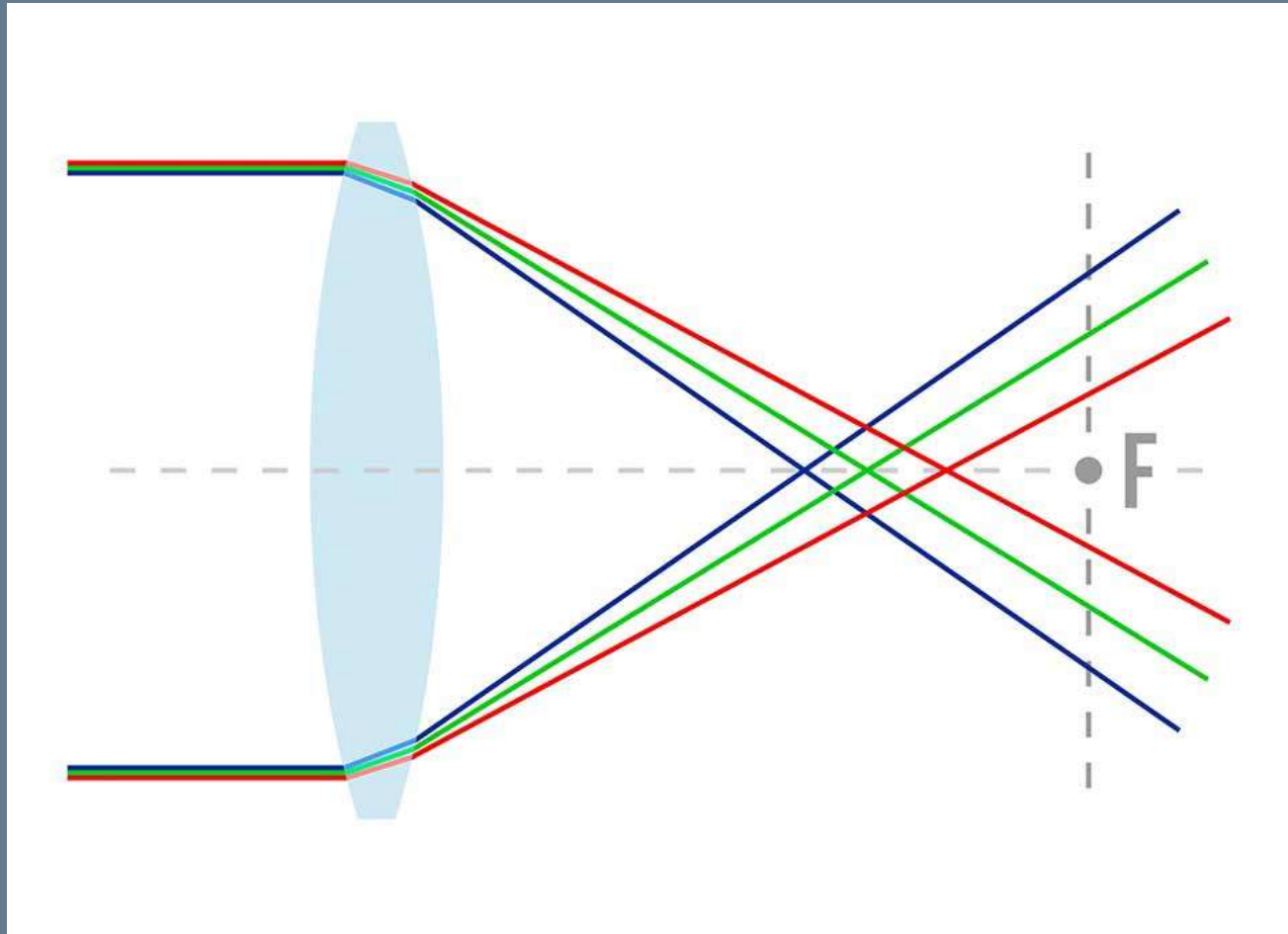


Impulsion blanche initiale

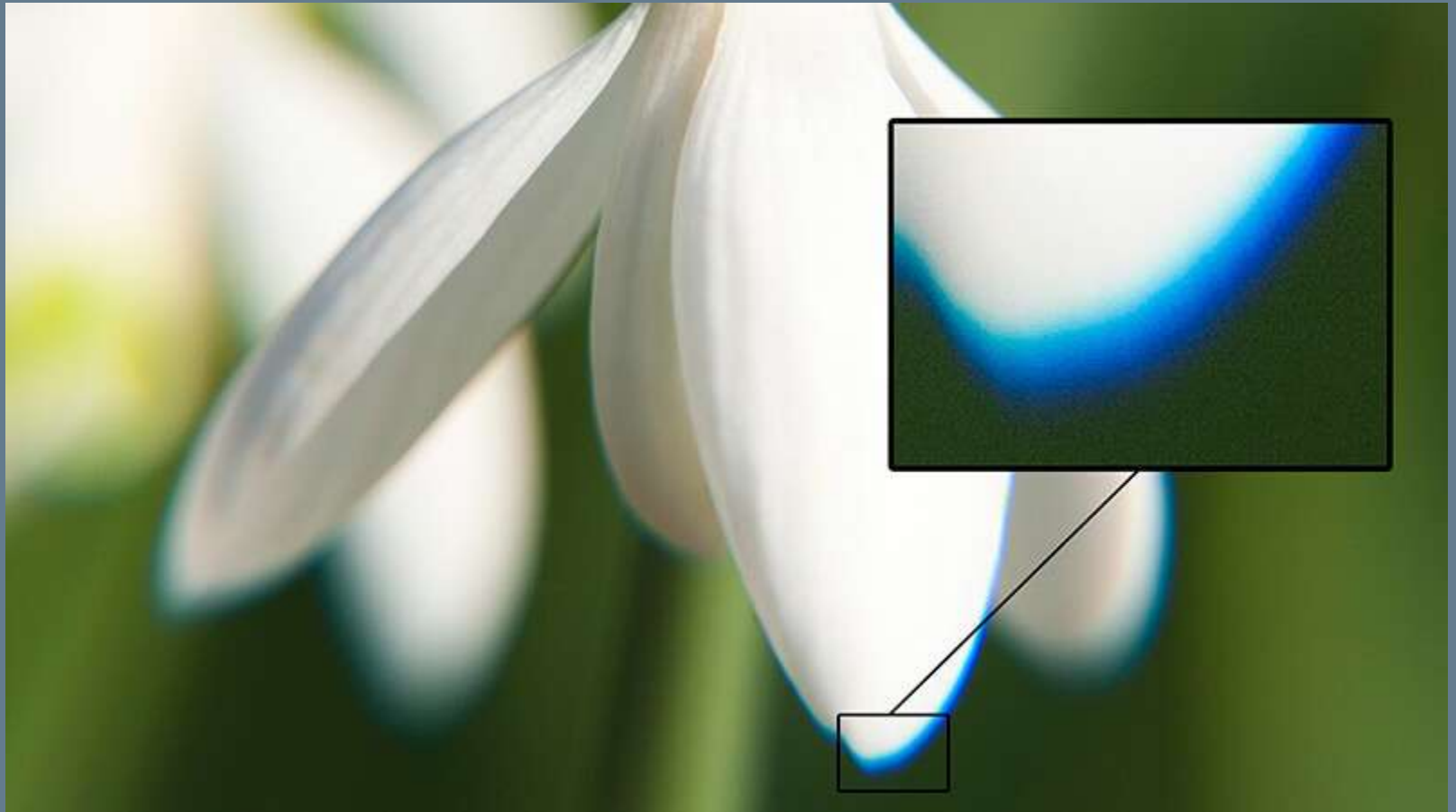
Impulsion finale élargie

- Après 20 cm ($t \sim 0,7\text{ns}$), le rouge à $\sim 1\text{ mm}$ d'avance sur le bleu.
- $D = 17\text{ ps/nm.km}$ (@1550 nm), à un débit de 40 Gb/s, pour une source $\Delta\lambda = 0,03\text{ nm}$ (diode laser $\sim 1\text{ nm}$), les impulsions se recouvrent après 50 km.

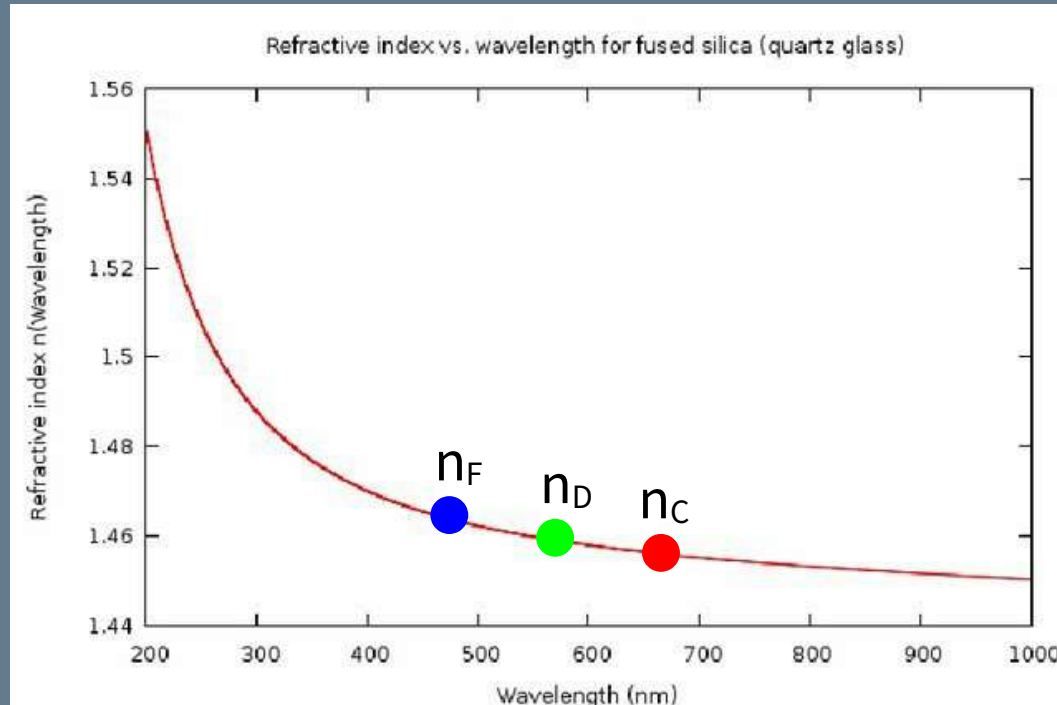
DISPERSION CHROMATIQUE



DISPERSION CHROMATIQUE



NOMBRE D'ABBE

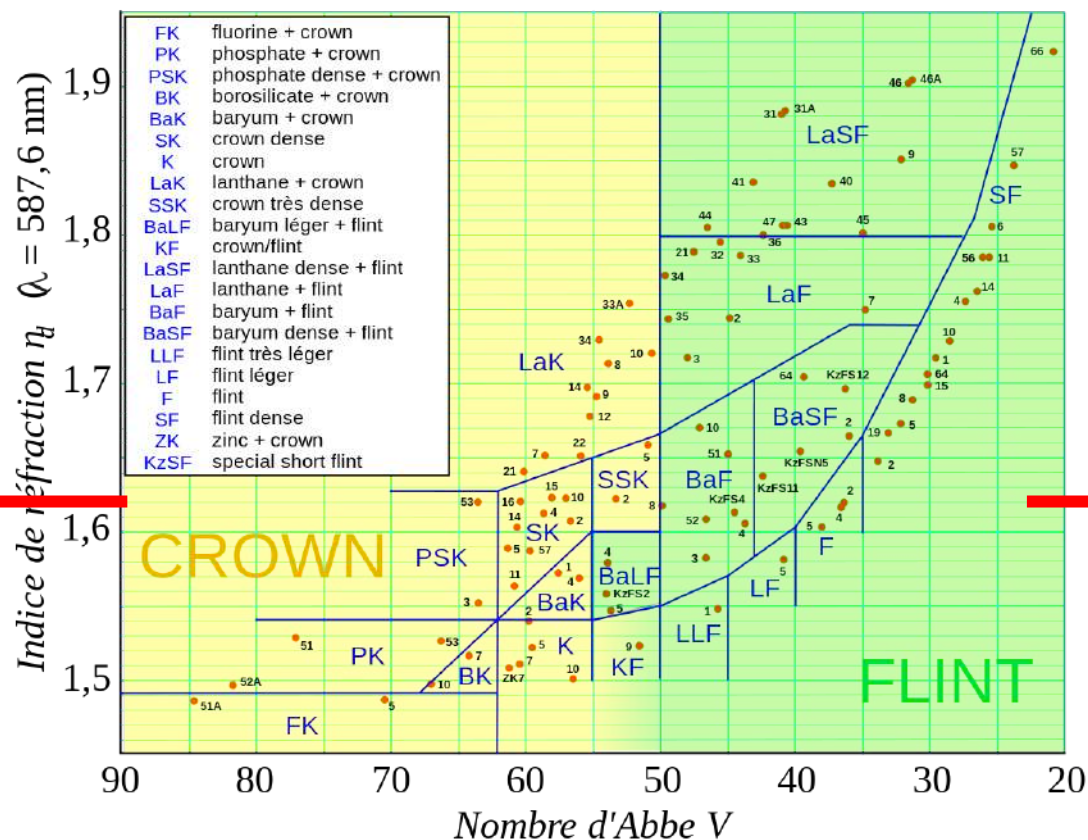


$$V = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C}$$

- n_D , indice pour la raie D du sodium à 589,3 nm
- n_F , indice pour la raie F de l'hydrogène à 486,1 nm
- n_C , indice pour la raie C de l'hydrogène à 656,3 nm

VERRES CROWN ET FLINT

Faible dispersion



Forte dispersion



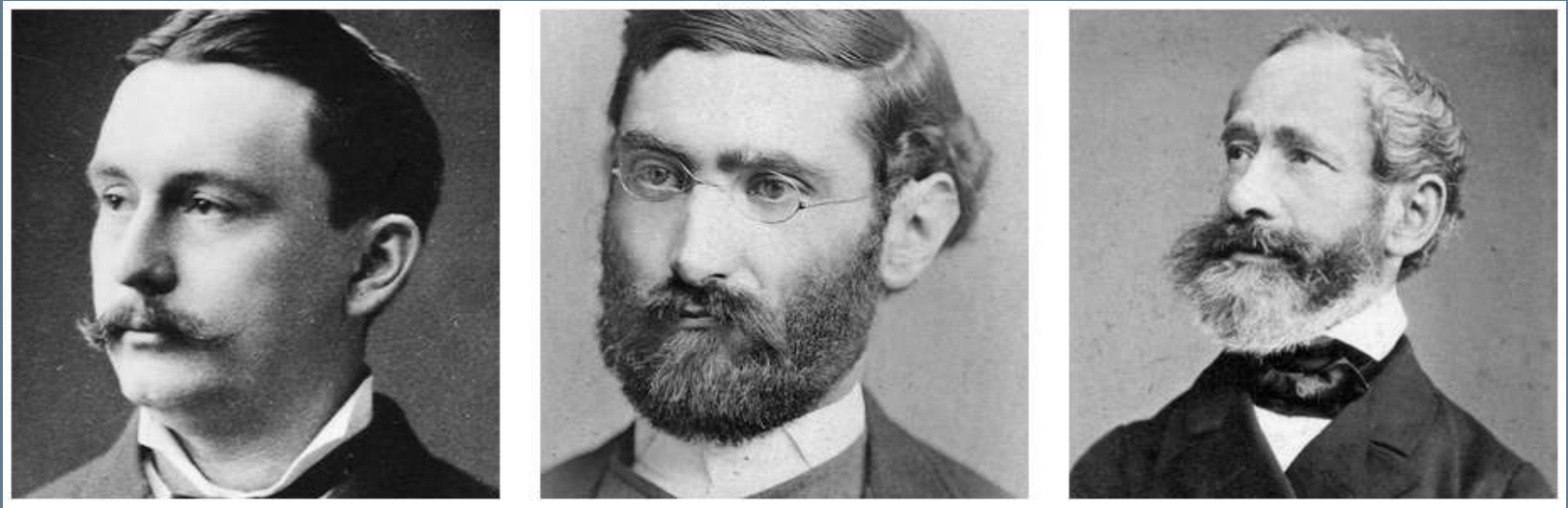
crown ($n = 1.55$, $V_d = 70$)



flint ($n = 1.9$, $V_d = 23$)

LA RÉVOLUTION DU VERRE OPTIQUE DU 19^E SIÈCLE

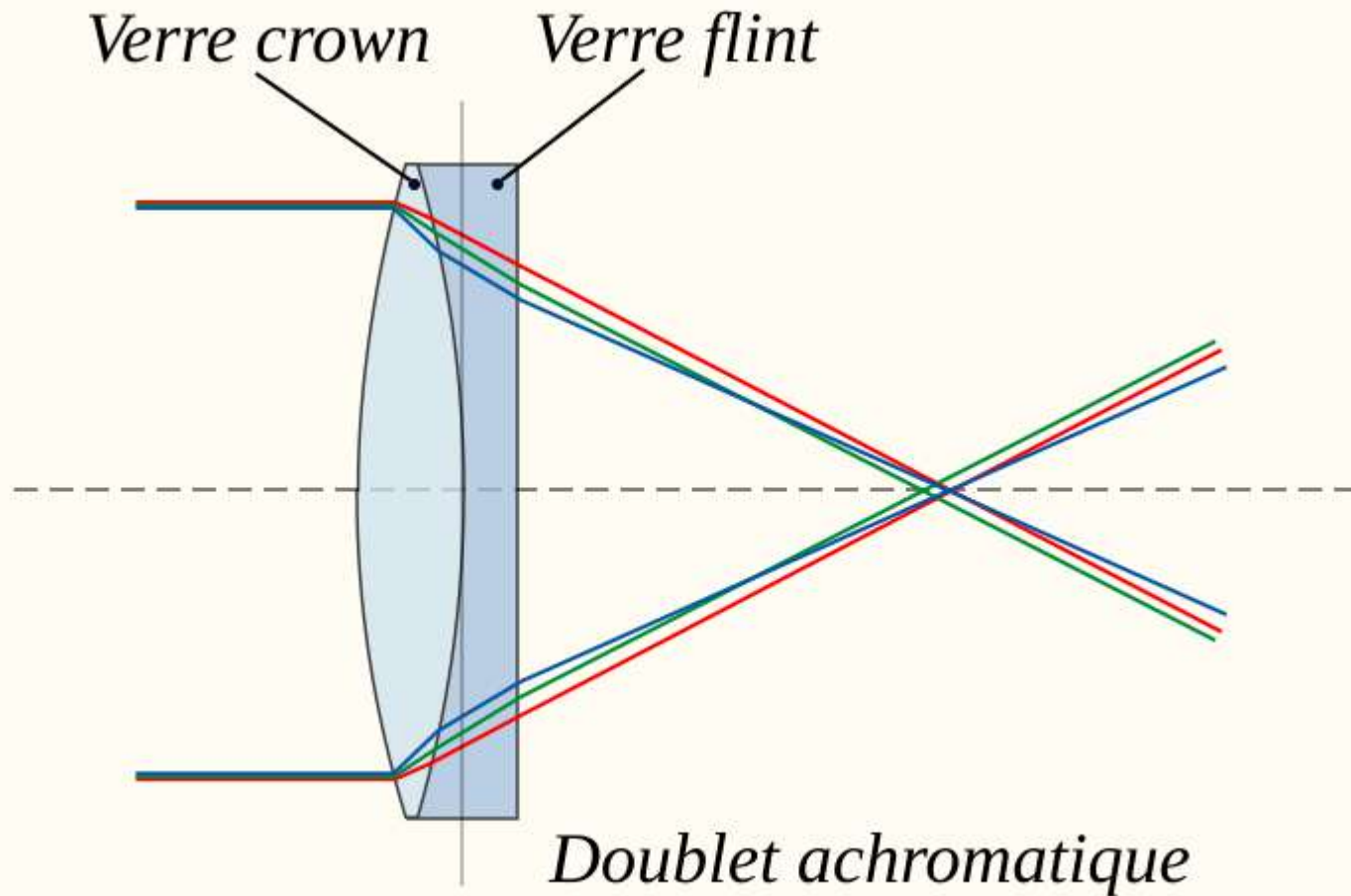
Otto Schott, Ernst Abbe, Carl Zeiss,



SCHOTT Optical Glass Catalog, “Productions- und Preis-Verzeichnis,” Glastechnisches Laboratorium Scott & Gen. 1886

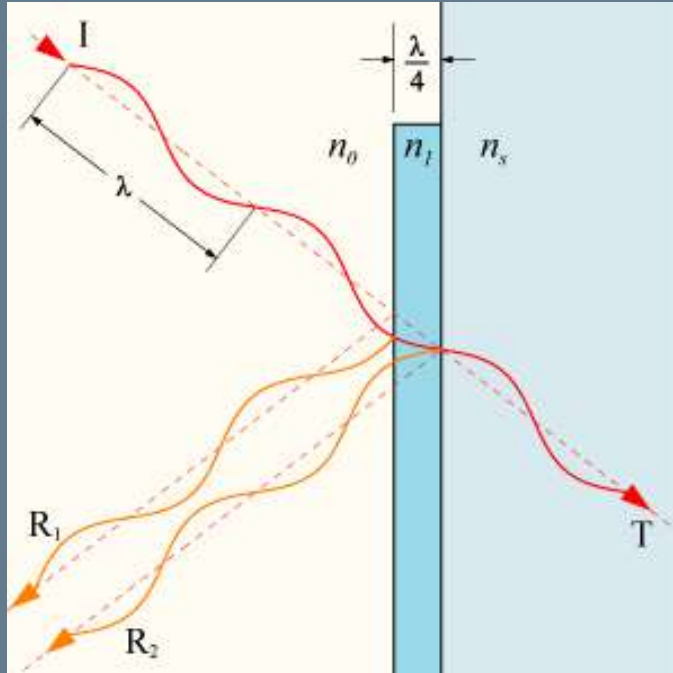
20 → 44 verres optiques

DOUBLET ACHROMATIQUE



Le verre propose la solution à son problème !
(comme pour les couches anti-reflets)

TRAITEMENT ANTI-REFLET



Condition sur les indices :

$$n_0 \times n_s = n_1^2$$

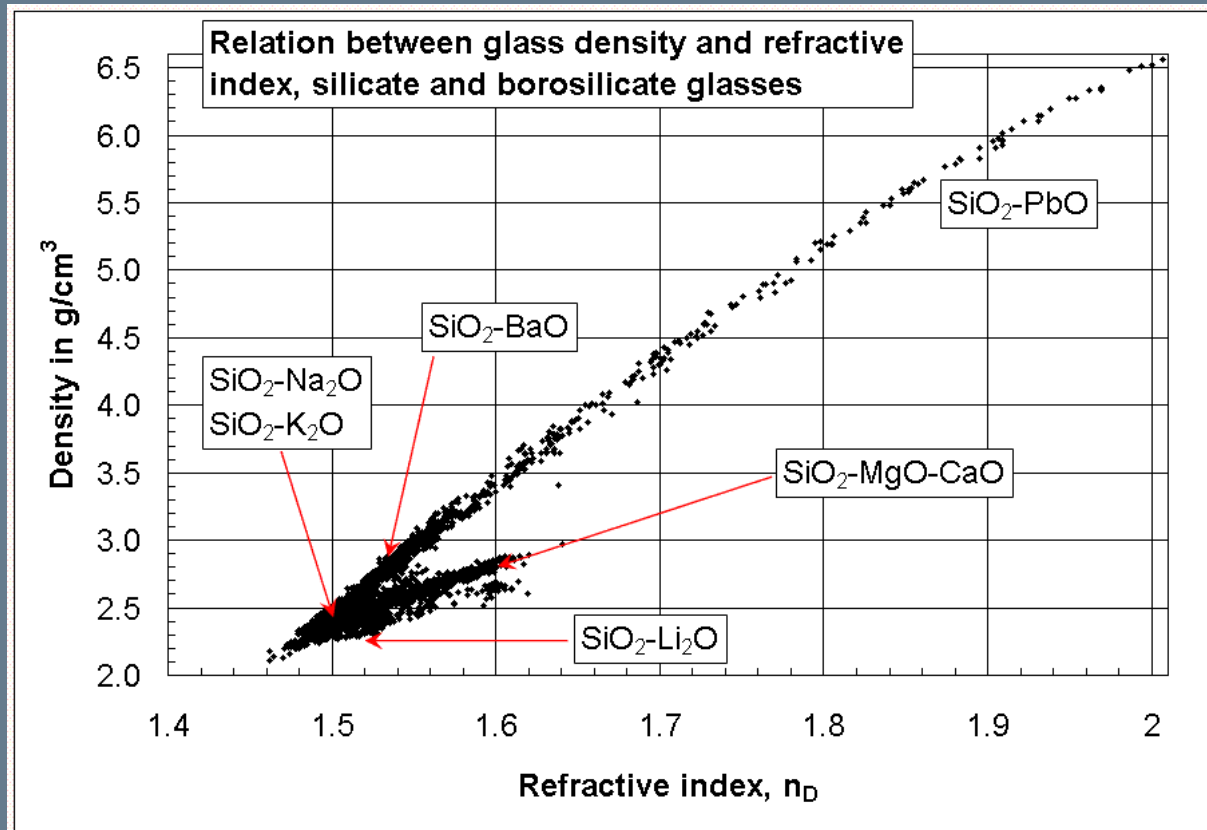
Si $n_0 \sim 1$ (air)

$$n_1 = \sqrt{n_s}$$

$$n_s = 1,5 \rightarrow n_1 = 1,2$$



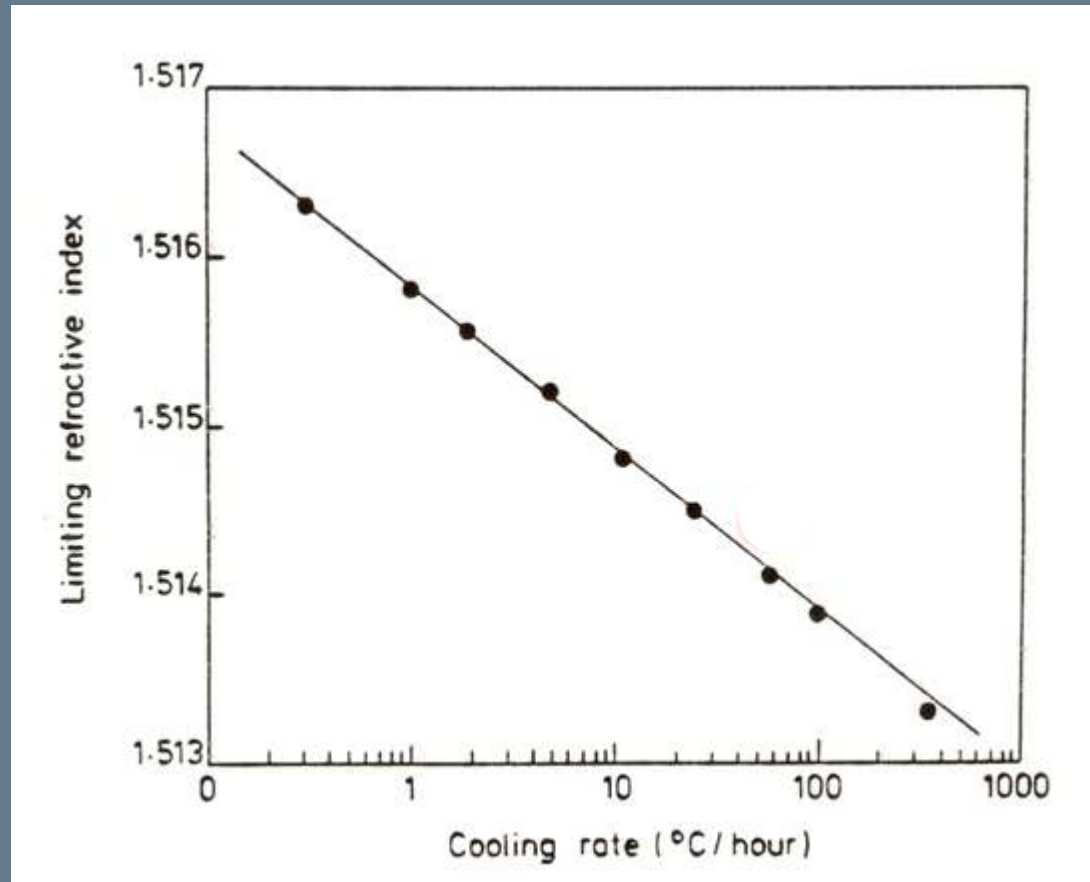
INDICE OPTIQUE



F et B diminuent l'indice de la silice

Al et P augmentent n mais $\text{Al}+\text{P}$ non si $\text{Al}/\text{P}=1$

INDICE DE RÉFRACTION VS TAUX DE REFROIDISSEMENT



VARIATION DE L'INDICE OPTIQUE VS TEMPÉRATURE

TABLE I. Refractive index vs temperature, fused silica
Corning code 7940, ultraviolet grade.

λ Microns	n 26°C	n 471°C	$(dn/dT)/$ °C×10 ⁶	n 828°C	$(dn/dT)/$ °C×10 ⁶
0.23021	1.52034	1.52908	+19.6	1.53584	+19.3
0.23783	1.51496	1.52332	+18.8	1.52985	+18.6
0.2407	1.51361	1.52201	+18.9	1.52832	+18.3
0.2465	1.50970	1.51774	+18.1	1.52391	+17.7
0.24827	1.50865	1.51665	+18.0	1.52289	+17.8
0.26520	1.50023	1.50763	+16.6	1.51351	+16.5
0.27528	1.49615	1.50327	+16.0	1.50899	+16.0
0.28035	1.49425	1.50143	+16.2	1.50691	+15.8
0.28936	1.49121	1.49818	+15.7	1.50358	+15.4
0.29673	1.48892	1.49584	+15.6	1.50112	+15.2
0.30215	1.48738	1.49407	+15.1	1.49942	+15.0
0.3130	1.48462	1.49126	+14.9	1.49641	+14.7
0.33415	1.48000	1.48633	+14.2	1.49135	+14.1
0.36502	1.47469	1.48089	+14.0	1.48563	+13.6
0.40466	1.46978	1.47575	+13.4	1.48033	+13.2
0.43584	1.46685	1.47248	+12.7	1.47716	+12.9
0.54607	1.46028	1.46575	+12.3	1.47004	+12.2
0.5780	1.45899	1.46429	+11.9	1.46870	+12.1
1.01398	1.45039	1.45562	+11.8	1.45960	+11.5
1.12866	1.44903	1.45426	+11.8	1.45820	+11.4
1.254 ^a	1.44772	1.45283	+11.5	1.45700	+11.6
1.36728	1.44635	1.45140	+11.4	1.45549	+11.4
1.470 ^a	1.44524	1.45031	+11.4	1.45440	+11.4
1.52952	1.44444	1.44961	+11.6	1.45352	+11.3
1.660 ^a	1.44307	1.44799	+11.1	1.45174	+10.8
1.701	1.44230	1.44733	+11.3	1.45140	+11.3
1.981 ^a	1.43863	1.44361	+11.2	1.44734	+10.9
2.262 ^a	1.43430	1.43933	+11.3	1.44306	+10.9
2.553 ^a	1.42949	1.43450	+11.3	1.43854	+11.3
3.00 ^a	1.41995	1.42495	+11.2	1.42877	+11.0
3.245 ^a	1.41353	1.41893	+12.2	1.42243	+11.1
3.37 ^a	1.40990	1.41501	+11.5	1.41915	+11.5

^a Wavelength determination by narrow-bandwidth interference filters.

JH Wray and JT Neu, JOSA B (1969)

$$\frac{dn}{dT} \approx +1 - 2 \cdot 10^{-5} / ^\circ C$$

n augmente ~linéairement avec T

$$+100 ^\circ C \rightarrow \Delta n = +10^{-3}$$

$$\frac{dn}{dT} = \left(\frac{\partial n}{\partial \rho} \right)_\alpha \frac{d\rho}{dT} + \left(\frac{\partial n}{\partial \alpha} \right)_\rho \left(\frac{\partial \alpha}{\partial T} \right)_\rho + \left(\frac{\partial n}{\partial \alpha} \right)_\rho \left(\frac{\partial \alpha}{\partial \rho} \right)_T \frac{d\rho}{dT}.$$

CZ Tan, JNCS (1998)

$$2n \frac{dn}{dT} = (n_0^2 - 1) \left(-3\alpha R - \frac{1}{E_{eg}} \frac{dE_{eg}}{dT} R^2 \right).$$

G. Gosh, JNCS (1995)

$$R = \frac{\lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_{ig}^2},$$

$$\lambda_{ig} = 0,107 \mu m$$

Jusqu'à maintenant, nous avons considéré le cas simple :

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}$$

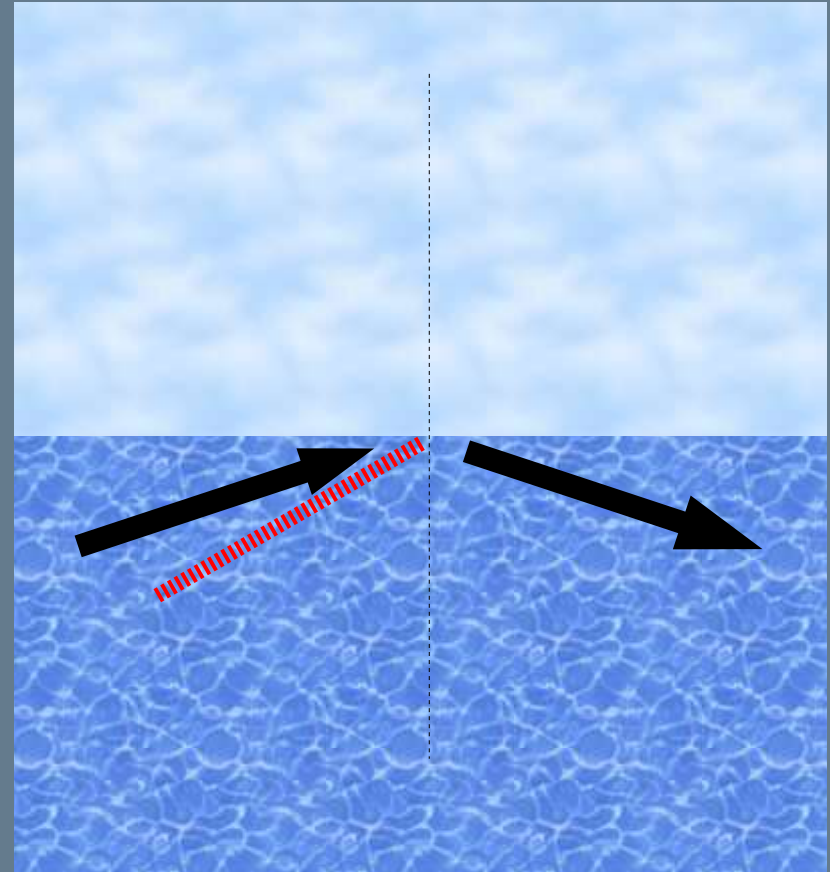
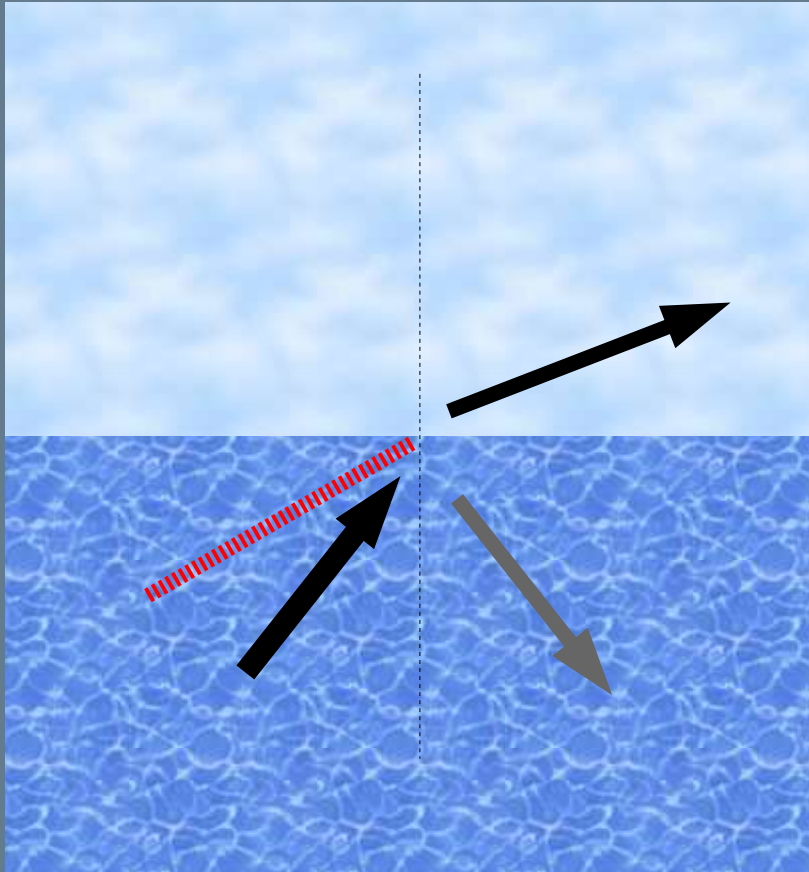
Mais il n'y a aucune raison pour que ϵ soit uniquement un scalaire.

$$\epsilon \rightarrow [\epsilon] = \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{xy} & \epsilon_{xz} \\ \epsilon_{yx} & \epsilon_{yy} & \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{zx} & \epsilon_{zy} & \epsilon_{zy} \end{bmatrix}$$

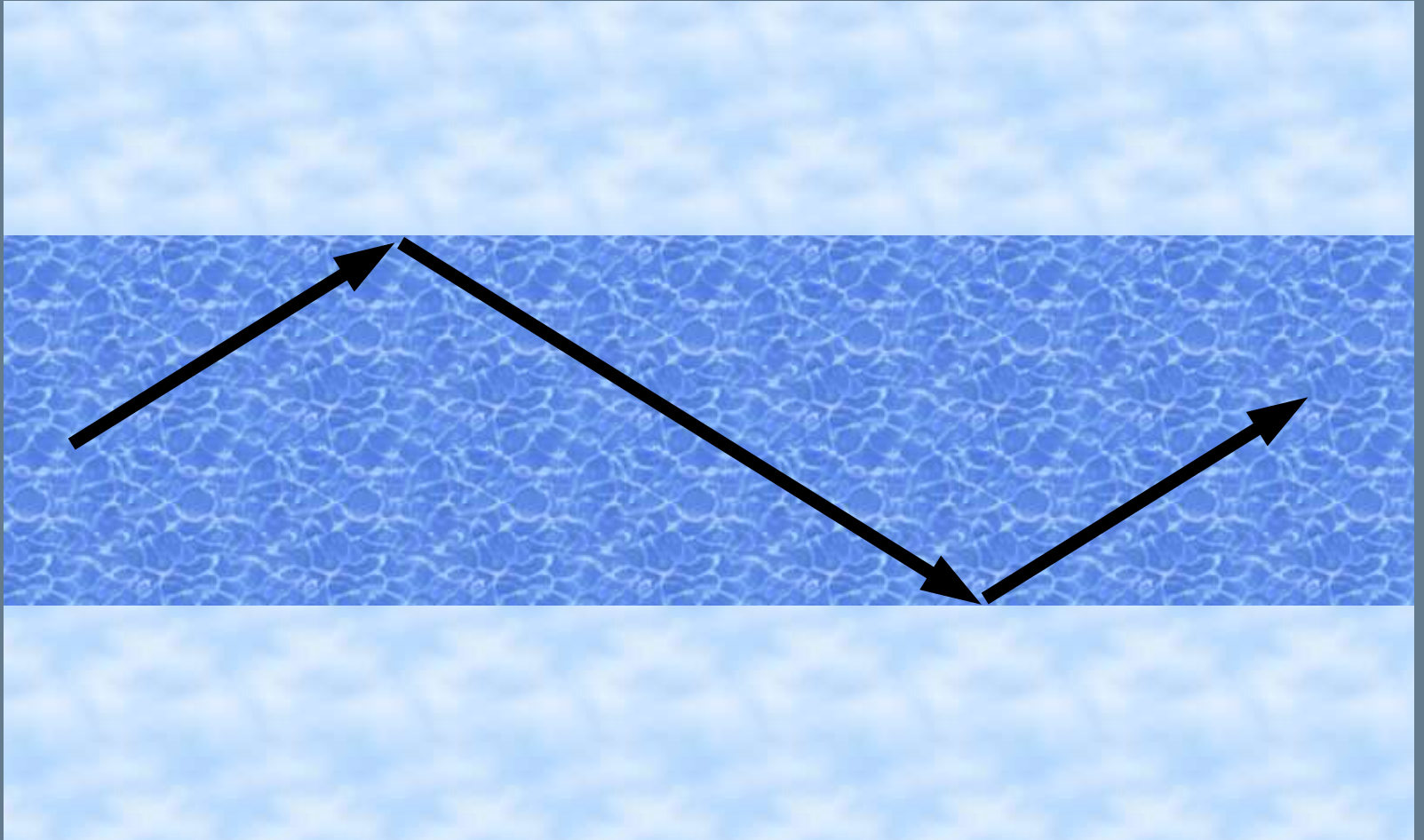
n devient alors aussi un tenseur.

Exemple : la biréfringence.

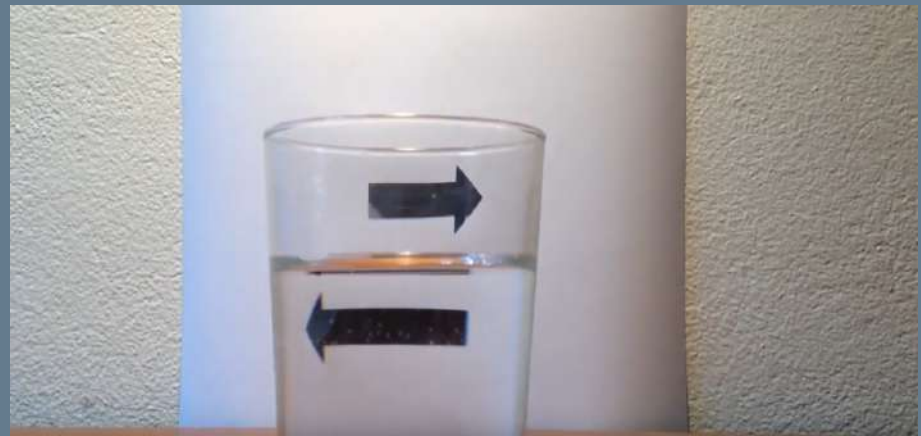
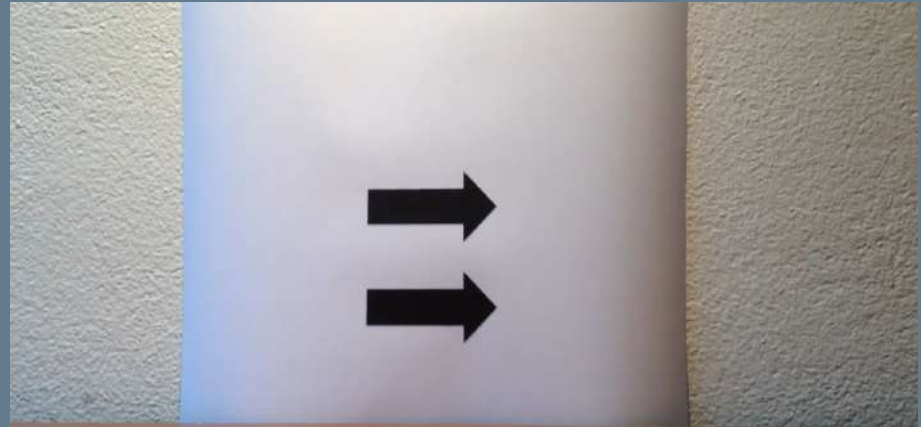
RÉFLEXION TOTALE INTERNE



GUIDAGE DE LA LUMIÈRE



LA MAGIE DE LA RÉFRACTION



COEFFICIENTS DE FRESNEL

- Coefficient de réflexion r en amplitude

$$r = A_{\text{réfléchi}}/A_{\text{incident}}$$

- Coefficient de transmission t en amplitude

$$t = A_{\text{transmis}}/A_{\text{incident}}$$

- $A_{\text{réfléchi}}$, A_{incident} et A_{transmis} = amplitudes associées aux champs électriques réfléchi, incident et transmis

- Coefficient de réflexion R en puissance - Réflectivité

$$R = P_{\text{réfléchi}}/P_{\text{incident}}$$

- Coefficient de transmission T en puissance – Transmittivité

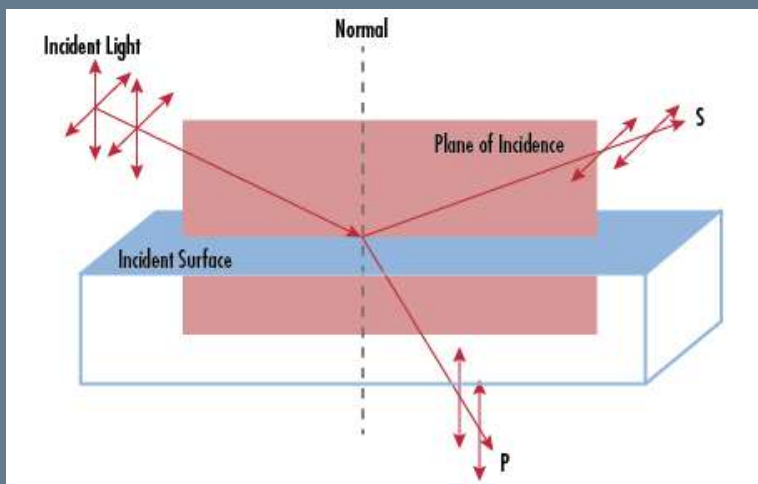
$$T = P_{\text{transmis}}/P_{\text{incident}}$$

COEFFICIENTS DE FRESNEL

Cas particulier si $\vartheta_i = 0^\circ$:
$$R = 1 - T = \left(\frac{n_{\text{incident}} - n_{\text{transmis}}}{n_{\text{incident}} + n_{\text{transmis}}} \right)^2$$

	indice	R ($\vartheta_i = 0^\circ$) (vide vers...)
vide	1	0 %
eau	1,33	2 %
verre	1,5	4 %
diamant	2,4	17 %

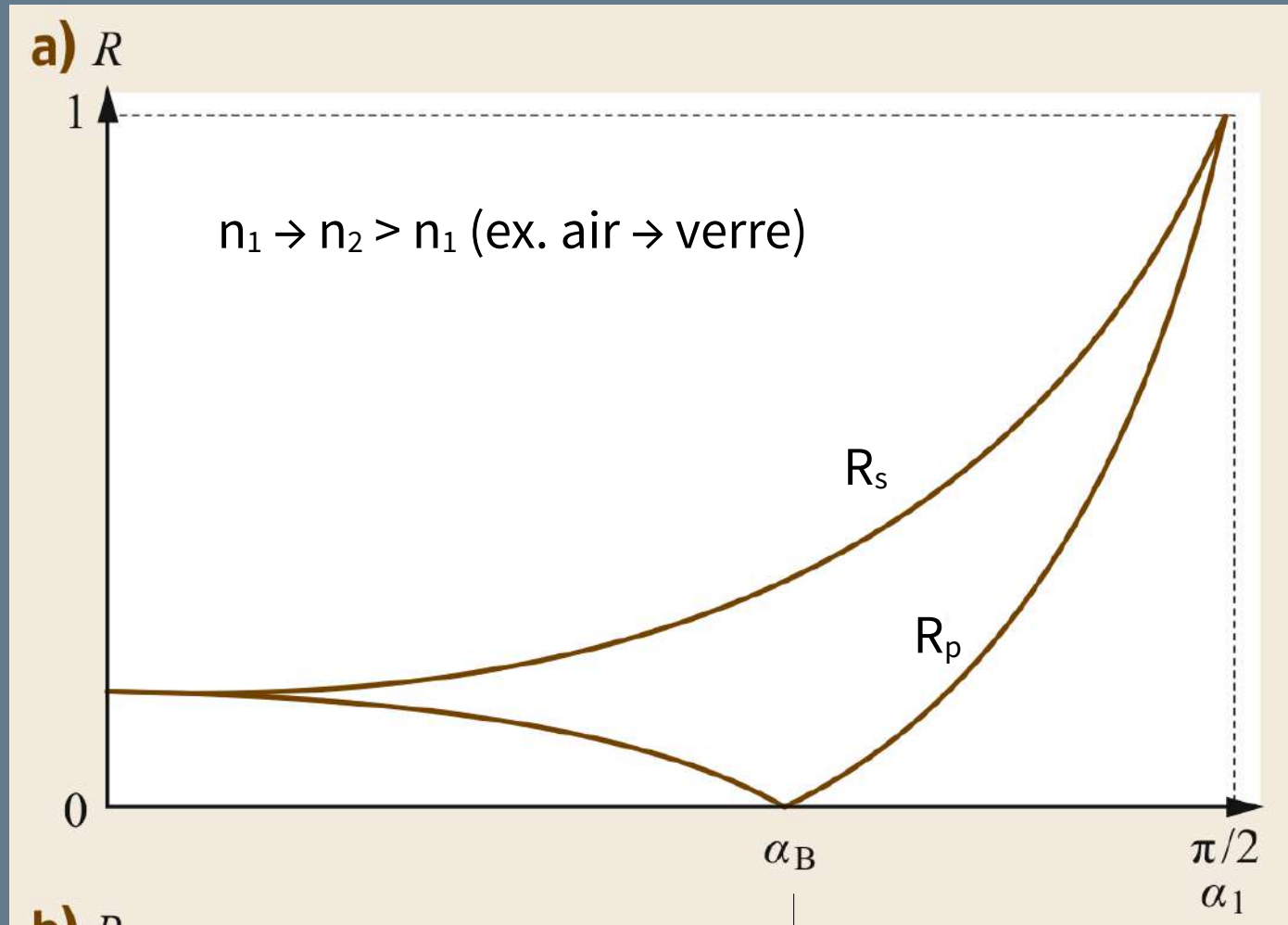
Pour les ondes polarisées s et p :



$$R_s = \left| \frac{n_i \cos \theta_i - n_t \cos \theta_t}{n_i \cos \theta_i + n_t \cos \theta_t} \right|^2 \quad T_s = 1 - R_s$$

$$R_p = \left| \frac{n_i \cos \theta_t - n_t \cos \theta_i}{n_i \cos \theta_t + n_t \cos \theta_i} \right|^2 \quad T_p = 1 - R_p$$

INTENSITÉ RÉFLÉCHIE EN FONCTION DE L'ANGLE D'INCIDENCE



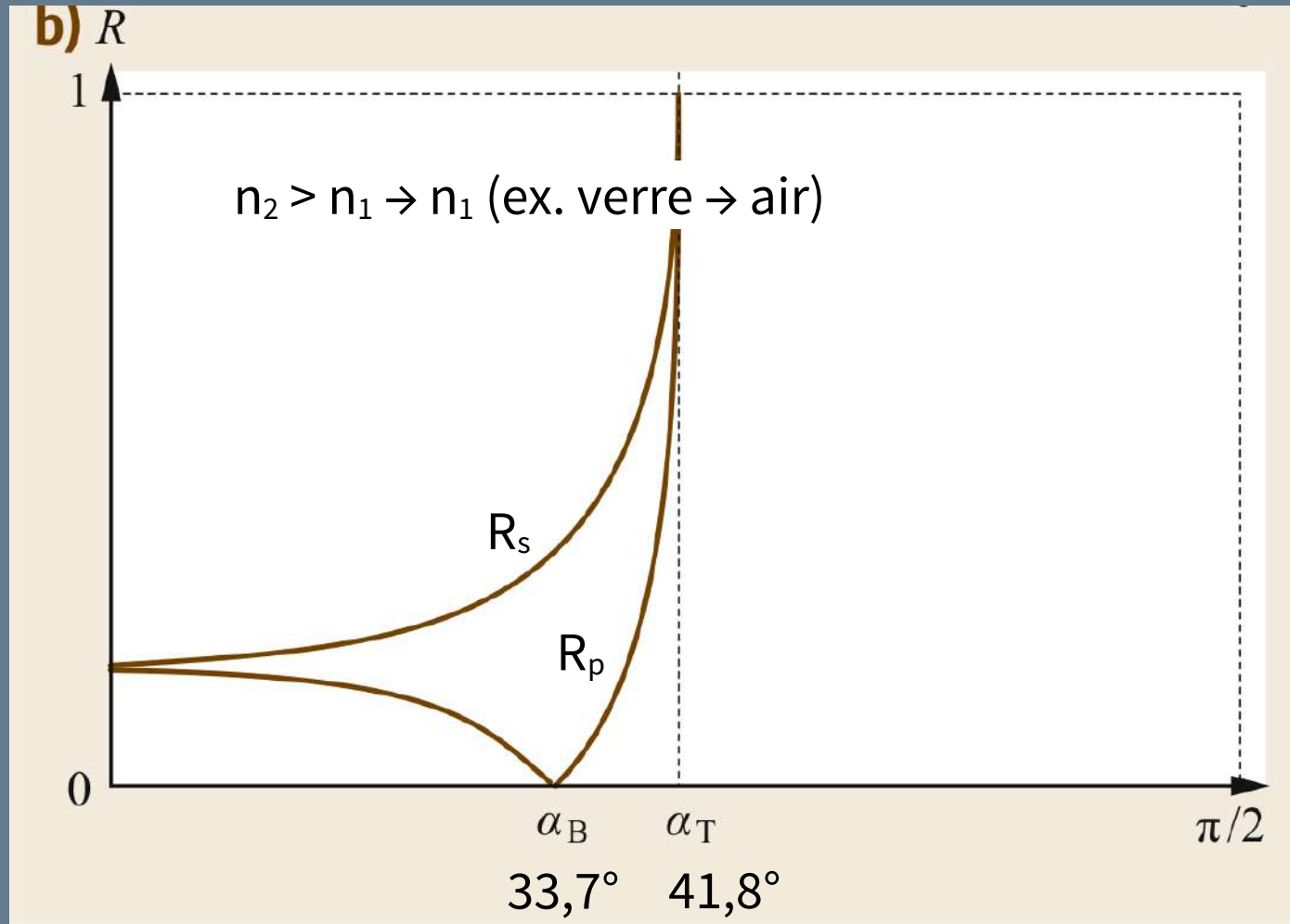
b) D

$$\tan \alpha_{\text{Brewster}} = \frac{n_2}{n_1}$$

Angle de Brewster
 $\sim 56^\circ$ pour les verres

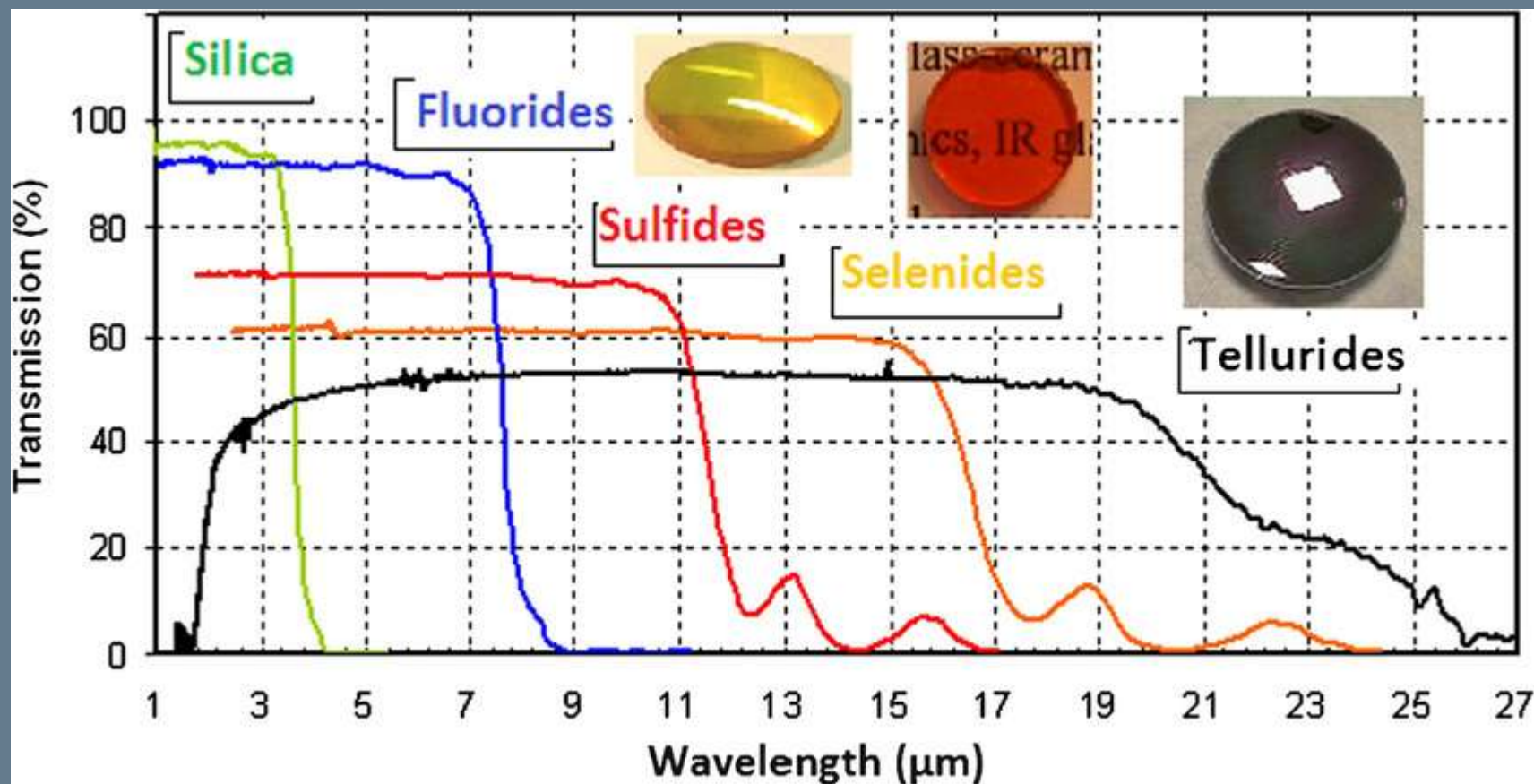
L. Calvez, JD Musgraves, J. Hu, Handbook of glass

INTENSITÉ RÉFLÉCHIE EN FONCTION DE L'ANGLE D'INCIDENCE

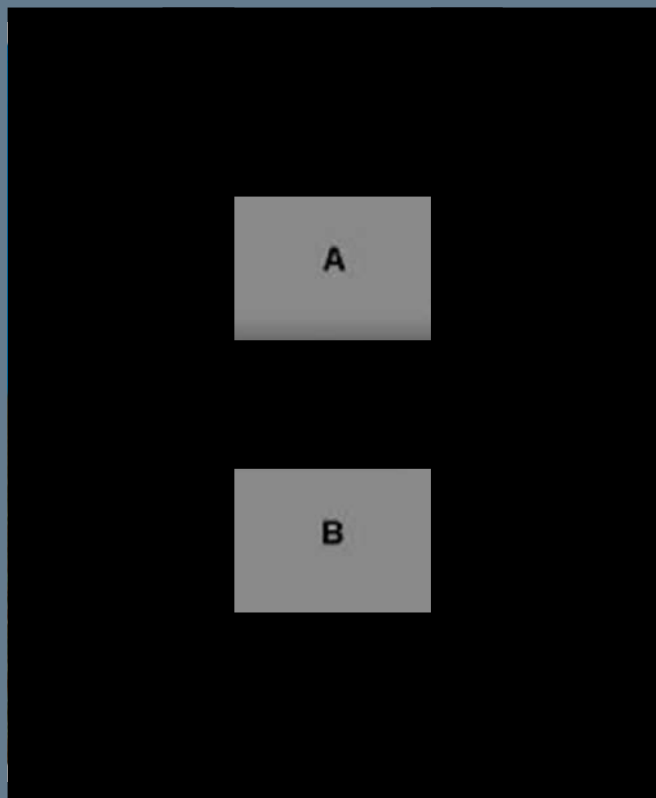


$$\alpha_T = \sin^{-1}\left(\frac{n_1}{n_2}\right)$$

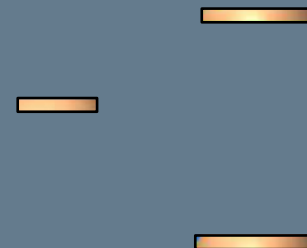
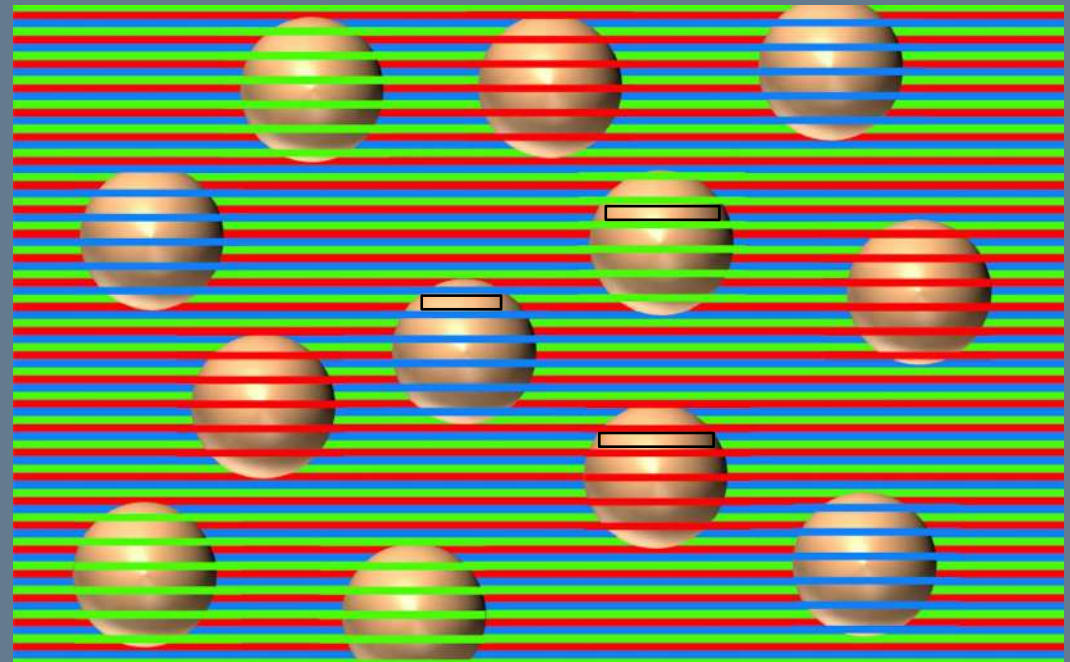
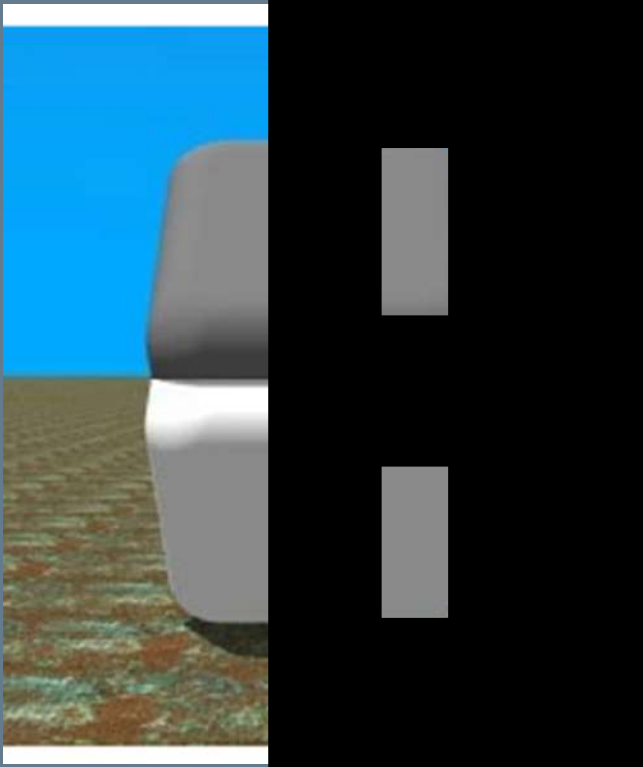
L. Calvez, JD Musgraves, J. Hu, Handbook of glass

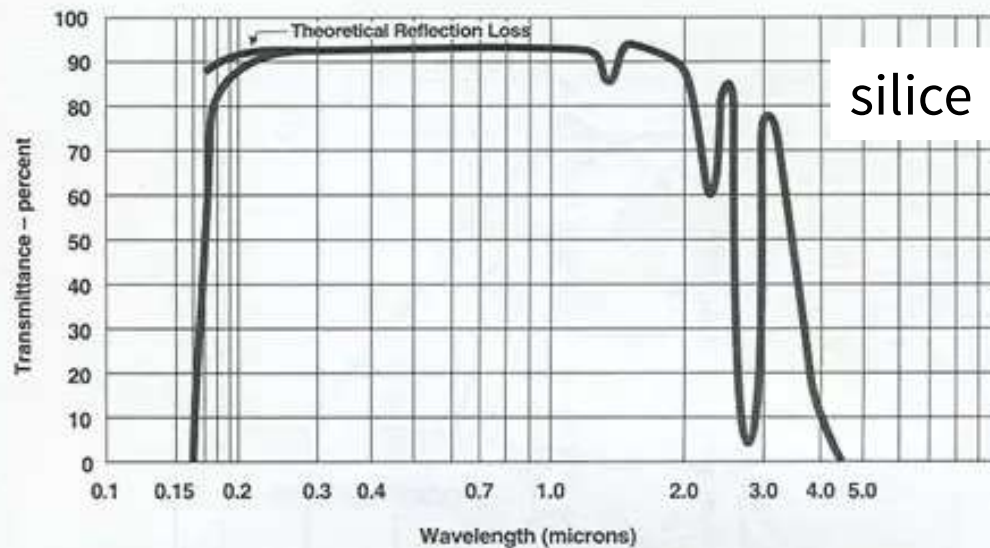


LA PERCEPTION DES COULEURS

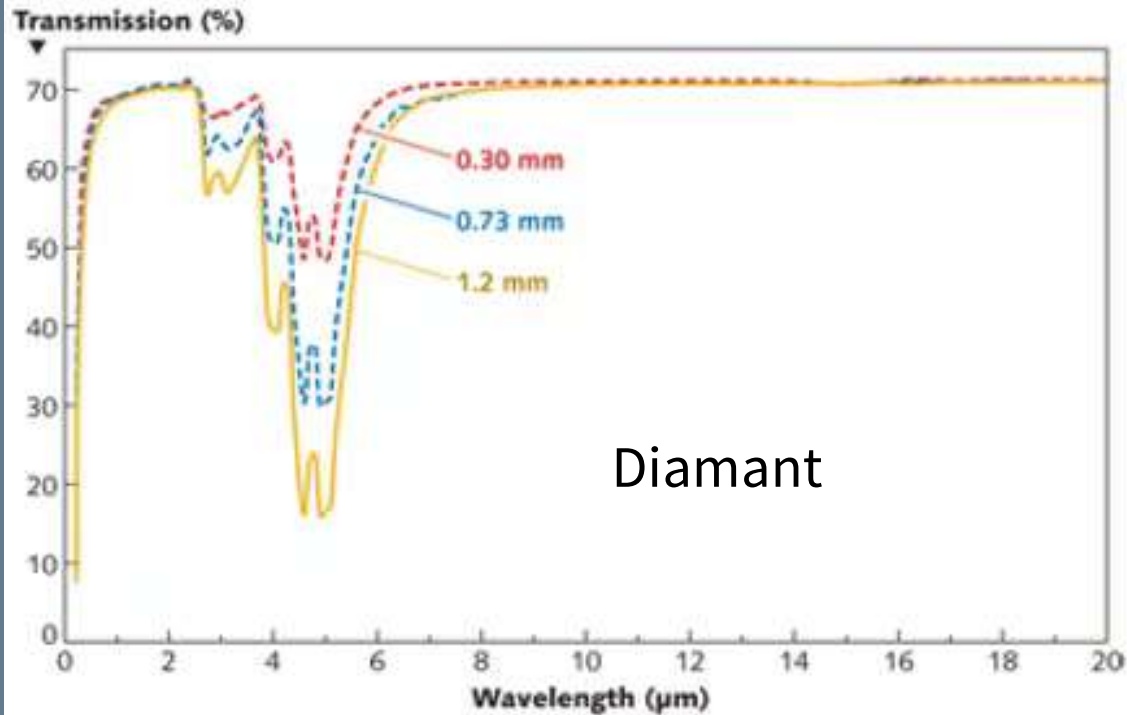


LA PERCEPTION DES COULEURS



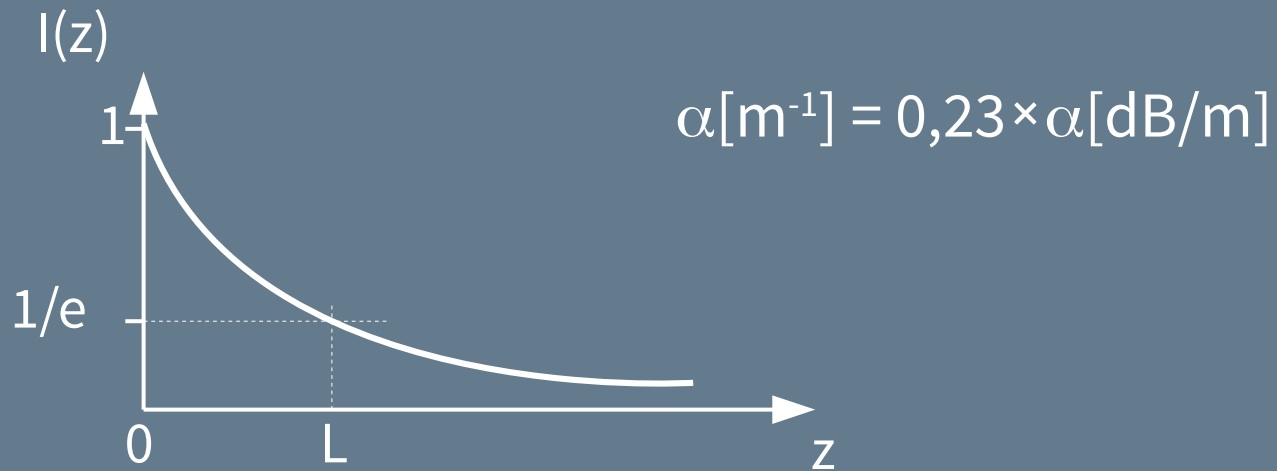


Transmission through 10mm Thickness of Optical Fused Silica



ABSORPTION

- **Loi de Beer-Lambert** : $I(z) = I_0 e^{-\alpha(\lambda)z}$ avec z : longueur de propagation (en m ou cm), I_0 : intensité incidente, $\alpha(\lambda)$: coefficient d'absorption (en m^{-1} ou cm^{-1}) dépendant de la longueur d'onde.
- **Longueur d'absorption** après laquelle l'intensité est de $1/e$ (37%) de l'intensité initiale : $L = 1 / \alpha(\lambda)$
- **Absorbance** = $\log_{10} (I_{\text{incidente}} / I_{\text{absorbée}}) = -\log_{10} T$



DIFFUSION DE LA LUMIÈRE

- Diffusion = lumière déviée dans de multiples directions.
- Diffusion **isotrope** = lumière répartie avec la même intensité dans toutes les directions.
- Diffusion **anisotrope** = lumière répartie avec une/des direction/s privilégiée/s (diagramme de rayonnement).
- Diffusion **élastique** : l'énergie du photon est conservée, seule sa trajectoire est modifiée.
- Diffusion **inélastique** : l'énergie du photon et sa trajectoire sont modifiées.
- La lumière qui retourne dans la direction de la lumière incidente est dite **rétro-diffusée ou contra-propagative**.

DIFFUSION DE RAYLEIGH, DE MIE

- Diffusion Rayleigh : valable si $\lambda > 10 \times$ la dimension des objets diffusants. Exemple du bleu du ciel. $\alpha \propto 1/\lambda^4$

$$Pertes\ Rayleigh \propto [objets\ diffusants] \times L \times \frac{d^6}{\lambda^4} \times n_m^2 \left(\frac{n_n^2 - n_m^2}{n_n^2 + 2n_m^2} \right)^2$$

L : longueur de l'échantillon, d : diamètre de la particule,

n_m : indice de la matrice, n_n : indice des particules

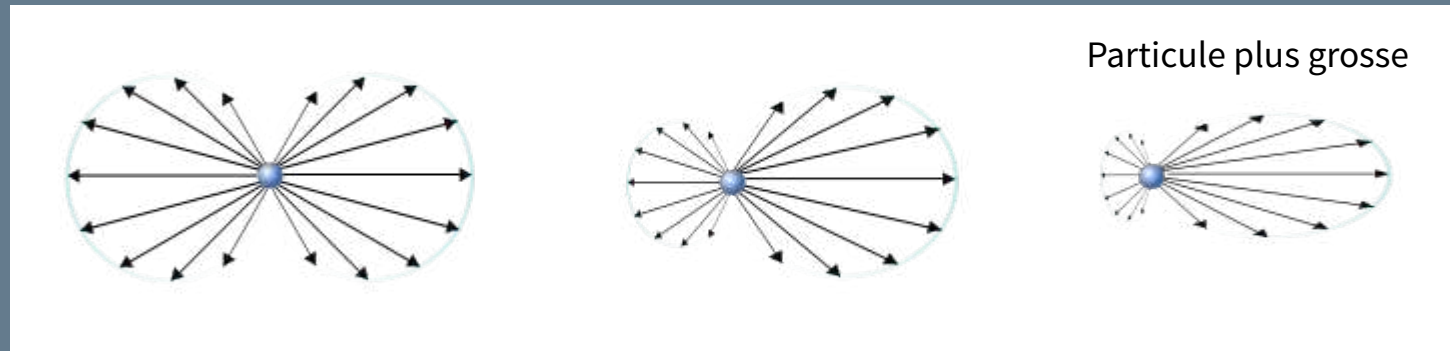
- Diffusion de Mie : pour les objets diffusants proches ou plus grands que λ . Exemple du lait blanc. $\alpha \propto 1/\lambda^x$ avec $x \sim 0,4-0,5$

- Milieux turbides (absorption et diffusion) :

$$\alpha (cm^{-1}) = N \sigma = \left(\frac{8}{9} \right) V_f k^4 a^3 \left(\frac{n_n}{n_m} \right)^2$$

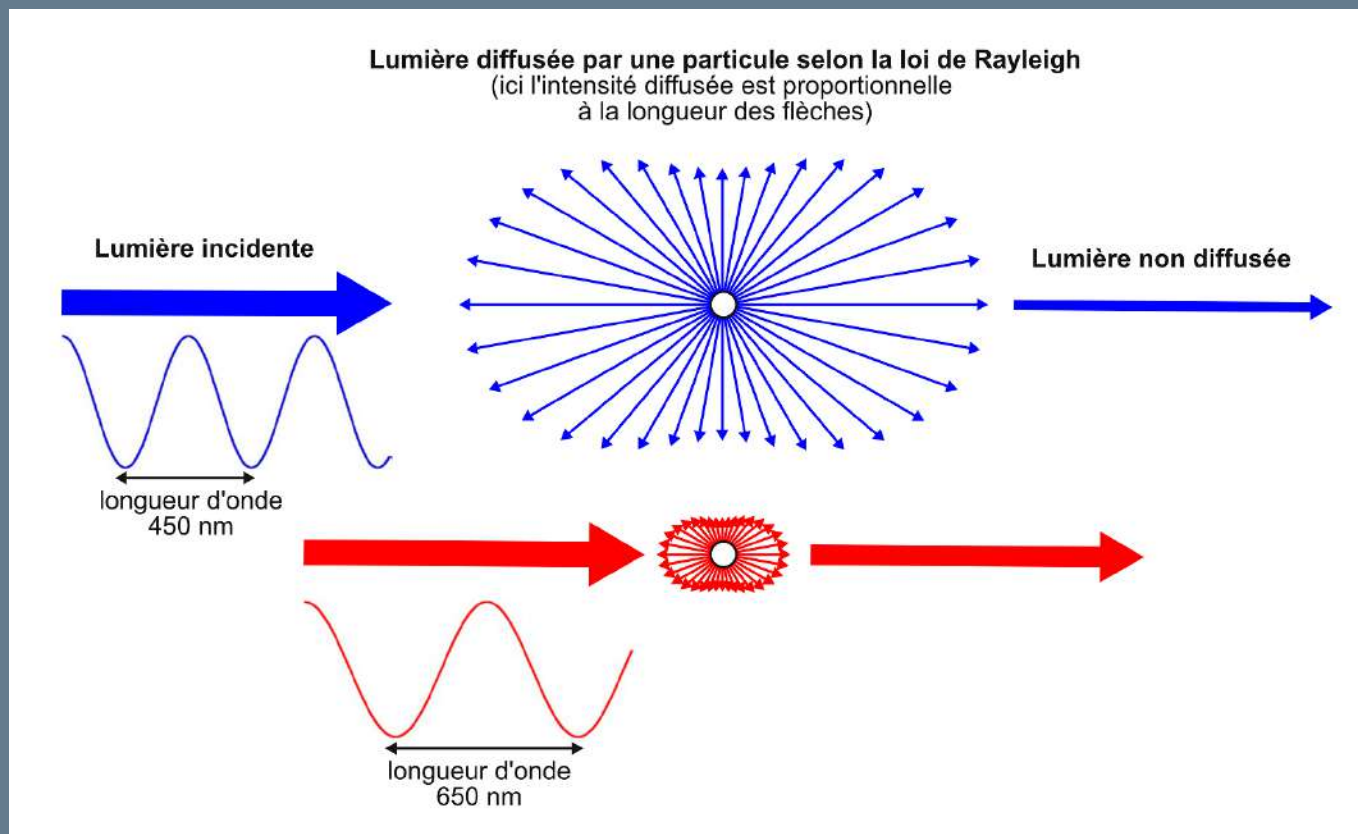
V_f : fraction volumique, a : rayon de la particule, $k = 2\pi n_m / \lambda$

DIFFUSION RAYLEIGH ET MIE



Rayleigh

Mie

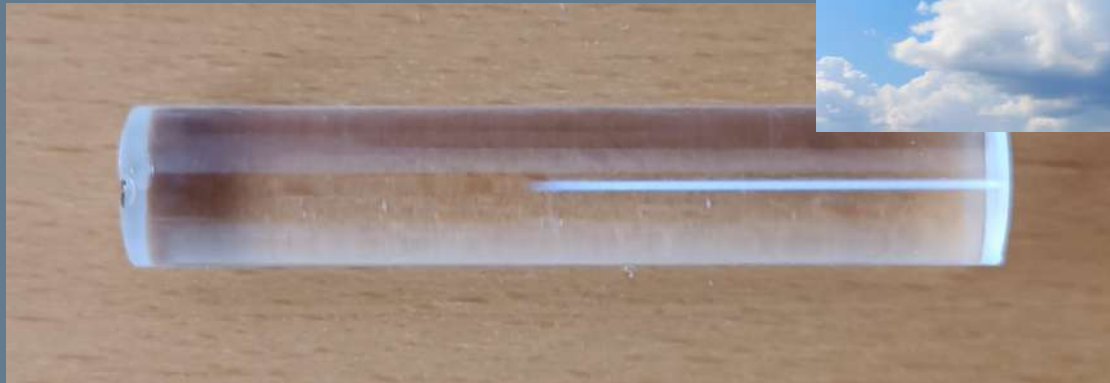


DIFFUSION DE LUMIÈRE PAR DES NANOPARTICULES

Diffusion Rayleigh



Diffusion Mie



n comme non-linéaire

