

Génie électrique et électronique
Microtechnique

MSE-101(b)
Propriétés optiques

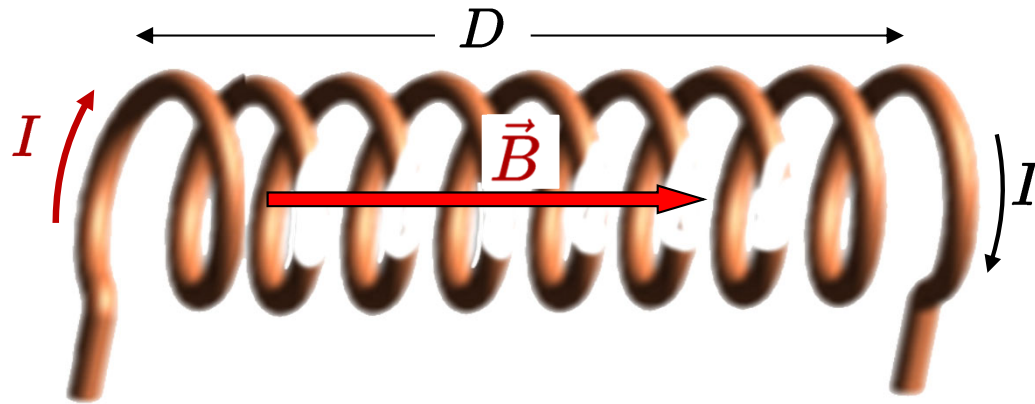
Roland Logé

Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne

EPFL

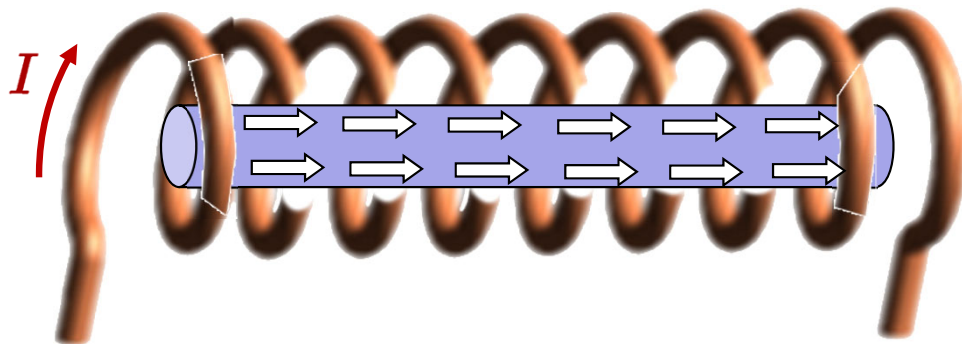
Rappels

Un courant électrique dans une bobine dans le vide crée **un champ magnétique** \vec{H} et **une induction magnétique** \vec{B} , reliés entre eux par la relation :



$$|\vec{B}| = \mu_0 |\vec{H}| = \mu_0 \frac{NI}{D} \quad [\text{Vs m}^{-2}]$$

Un matériau possédant des moments magnétiques en son sein (paramagnétique) voit ceux-ci s'orienter sous l'effet du champ magnétique. **L'aimantation résultante** \vec{M} s'ajoute alors au champ magnétique pour l'induction magnétique :



$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) = \mu_0 \mu_r \vec{H}$$

$$\vec{M} = \chi_M \vec{H}$$

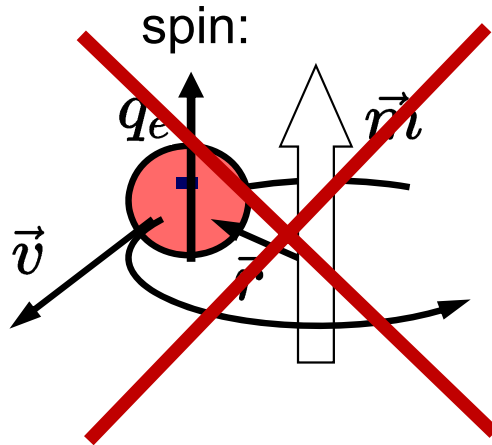
$$\mu_r = (1 + \chi_M)$$

Rappels

L'**aimantation résultante** du matériau est la densité de **moments magnétiques** au niveau des atomes :

$$\vec{M} = \frac{1}{V} \sum_i \vec{m}_i \quad \left[\frac{\text{Am}^2}{\text{m}^3} = \frac{\text{A}}{\text{m}} \right]$$

Les moments magnétiques (atomiques) sont essentiellement dus aux électrons (des orbitales et libres) et résultent d'une contribution orbitale, mais surtout des spins (les nucléons ont un moment magnétique beaucoup plus faible) :



Vision classique

Moment magnétique orbital :

$$|\vec{m}| = -\frac{|q_e|\hbar}{2m_e} \sqrt{l(l+1)} m_l = -\mu_B \sqrt{l(l+1)} m_l$$

Moment magnétique de spin : $\mu_S \approx 2\mu_B m_s = \pm\mu_B$

$$\mu_B = \frac{|q_e|\hbar}{2m_e} = 9.274 \times 10^{-24} [\text{Am}^2]$$

magnéton de Bohr

Rappels

On distingue plusieurs situations d'un point de vue magnétique pour les matériaux :

❑ **Diamagnétisme** : Pas de moment magnétique inhérent au matériau, mais moments induits dans un champ magnétique

- Susceptibilité $\chi_M < 0$ et $\approx 10^{-5}$

Exemples: la plupart des isolants, Cu, Zn, Si, Ag, Au

❑ **Paramagnétisme** : (cas illustré slide 2)

Exemples: Al, Cr, Mo, Ti, Na

❑ **Ferromagnétisme** : A une température suffisamment basse, les moments magnétiques d'un matériau paramagnétique s'orientent spontanément en des domaines de Weiss où ils sont alignés. Placés dans un champ magnétique externe, ces domaines peuvent tous s'orienter dans la direction du champ et peuvent même conserver cette aimantation en champ magnétique nul.

Exemples: Fe, Ni, Co, alliages Fe-B-Nd

Rappels

En dessous de la température de Curie, T_C , les ferromagnétiques présentent un cycle d'hystérèse, avec un champ coercitif plus ou moins fort qui caractérise le type d'aimant.

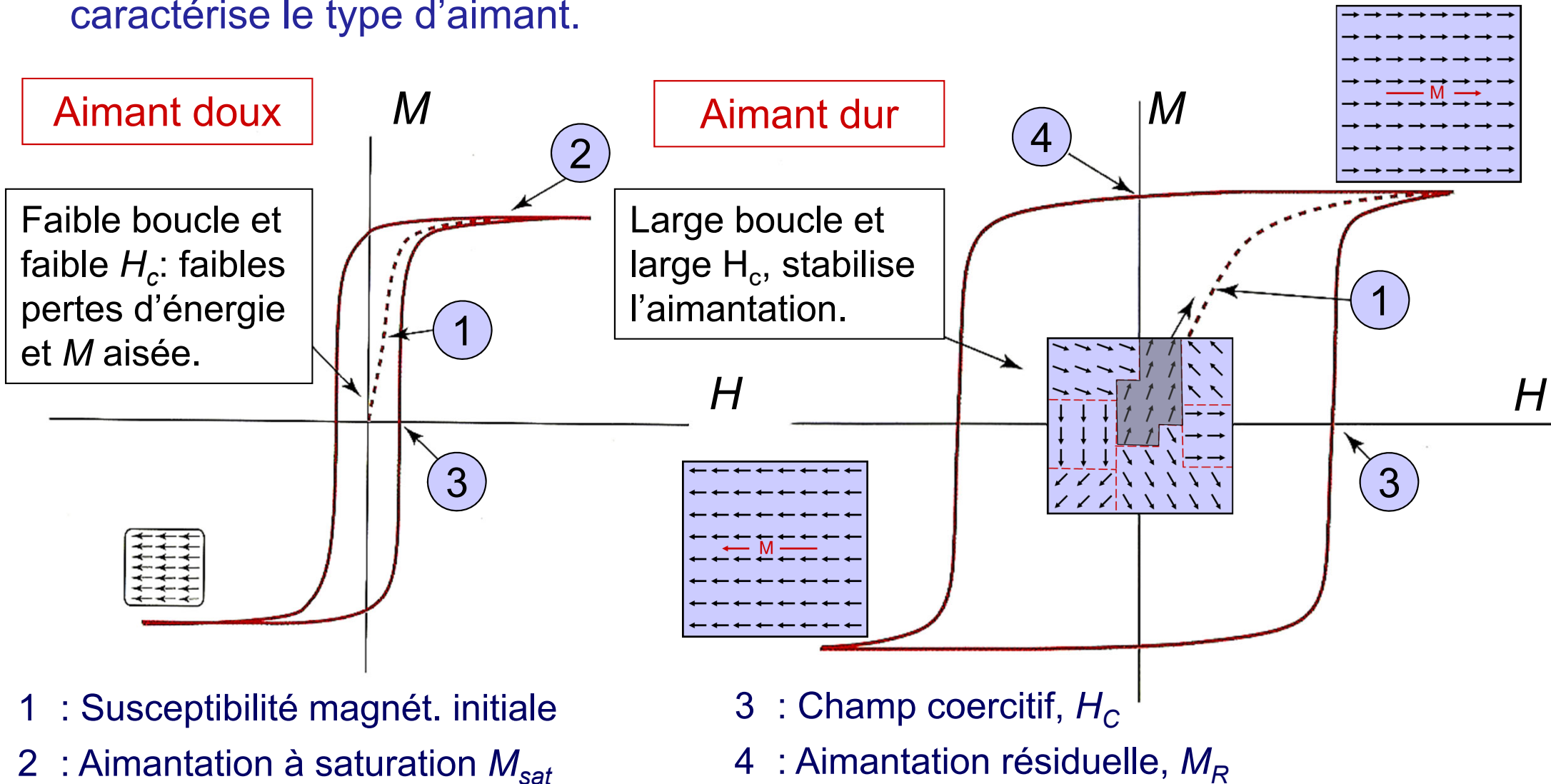
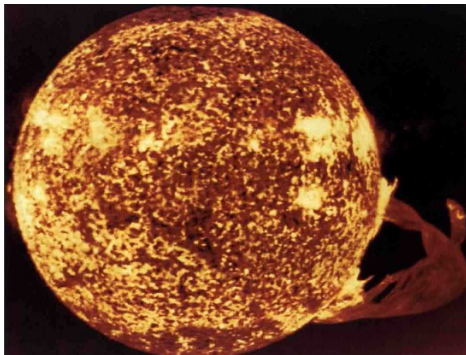


Table des matières

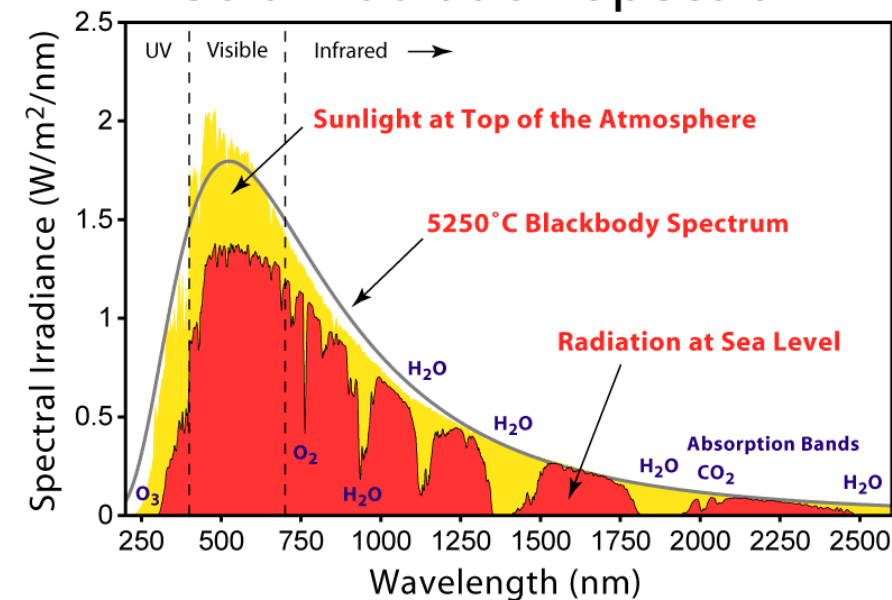
- Introduction
- Les ondes électromagnétiques
- Indice de réfraction
- Propriétés optiques des matériaux
 - Métaux
 - Semi-conducteurs
 - Diélectriques

Introduction

Les **propriétés optiques** des matériaux, même si elles sont de nature électromagnétique, sont classées à part vu leur importance et leur vaste champ d'applications.

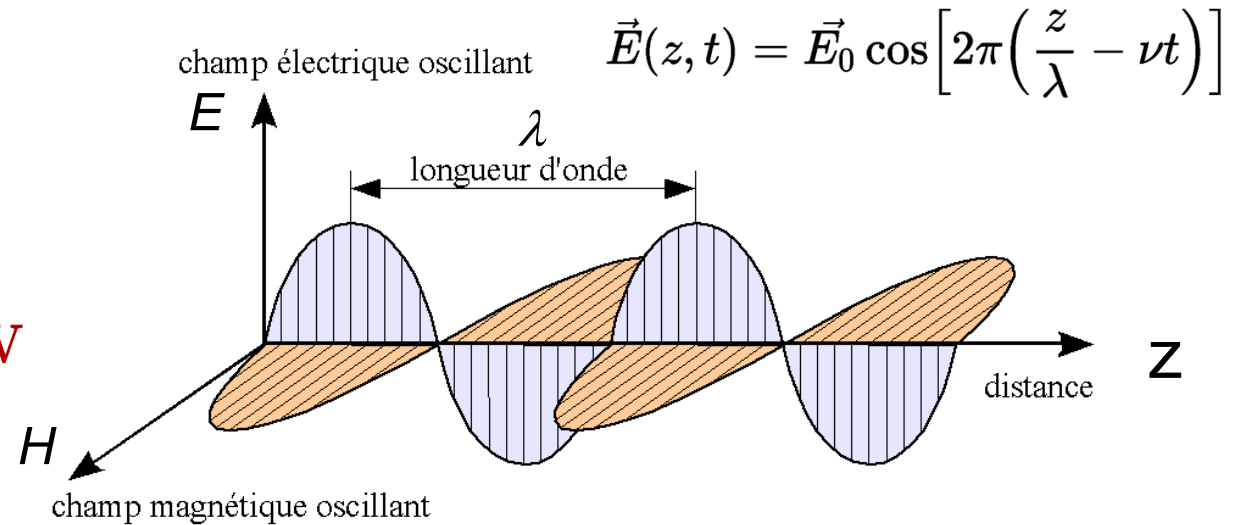
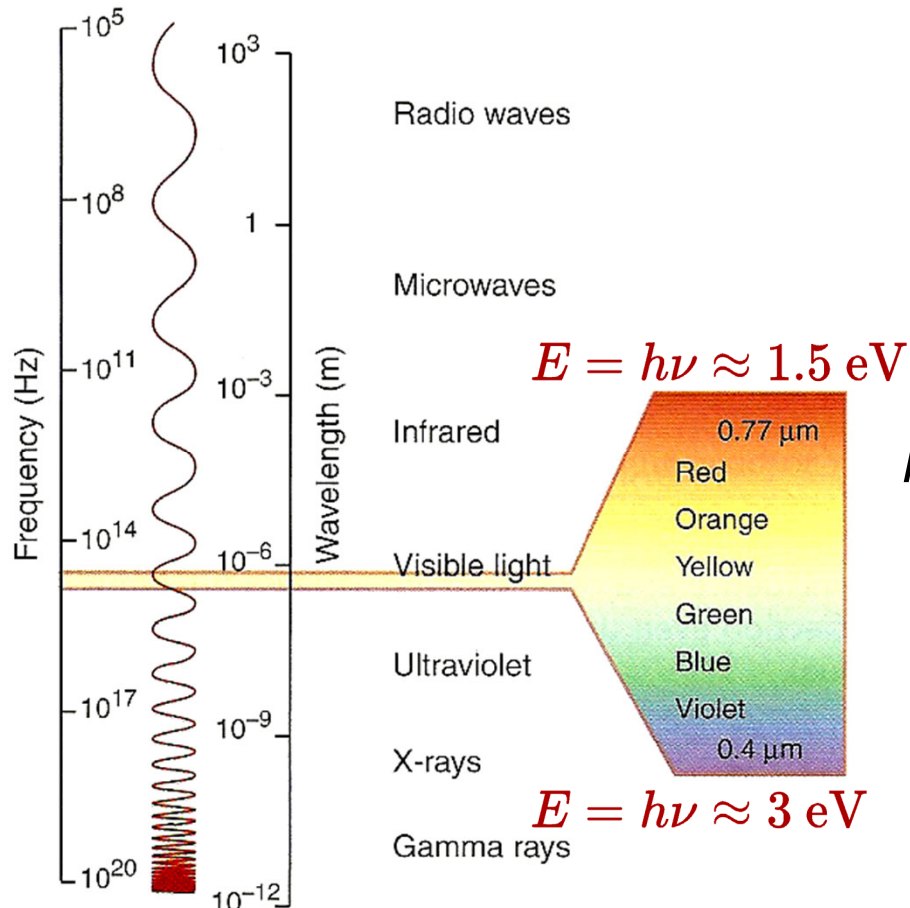


Solar Radiation Spectrum



Les ondes électromagnétiques

La lumière visible est une **onde électromagnétique** dont la **longueur d'onde λ** est située dans la gamme de sensibilité de notre œil (**400-800 nm**). Dans le vide :



$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$\nu = 3.75 - 7.5 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}$$

Considérant aussi le rayonnement IR et UV, les propriétés optiques des matériaux correspondent à leur réponse à des excitations électromagnétiques à des **fréquences comprises entre 10^{12} s^{-1} et 10^{16} s^{-1}**

Les ondes électromagnétiques

Les équations de Maxwell (dans le vide):

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

James Clerk Maxwell (1831--1879)



L'équation d'onde dans le vide :

$$\vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{E}) = \underbrace{\vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{E})}_{=0} - \vec{\nabla}^2 \vec{E} = -\mu_0 \frac{\partial}{\partial t} \nabla \times \vec{H} = -\varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

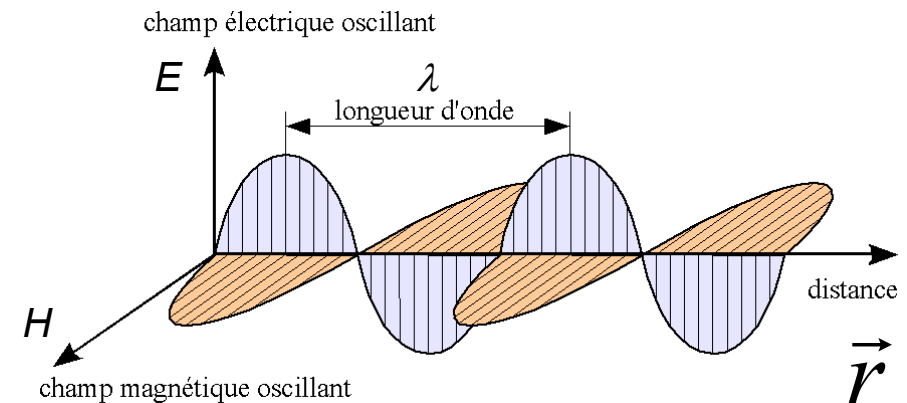
$$\vec{\nabla}^2 \vec{E} = \Delta \vec{E} = \underbrace{\varepsilon_0 \mu_0}_{c^{-2}} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

$$\vec{E}(z, t) = \vec{E}_0 \cos(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)$$

$$c = (\varepsilon_0 \mu_0)^{-1/2} = \lambda \nu = \frac{\omega}{k}$$

$k = \frac{2\pi}{\lambda}$: nombre d'onde

$\omega = 2\pi\nu$: pulsation



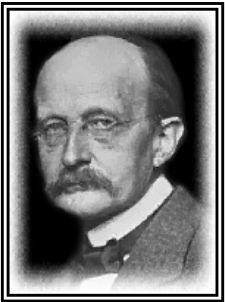
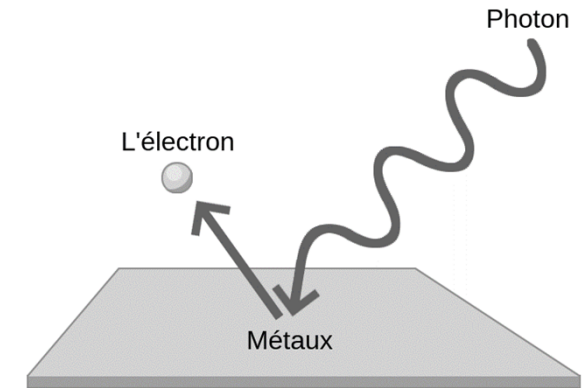
Des ondes bien connues....



Les ondes électromagnétiques

Alors que la vision classique d'**onde**, et les **équations de Maxwell**, ont donné un cadre théorique qui a permis d'interpréter de nombreux phénomènes, certains restaient incompris, notamment **l'effet photoélectrique**.

Si la lumière incidente n'a pas la bonne fréquence, un électron ne peut pas être arraché du métal, quelle que soit l'intensité du faisceau incident..



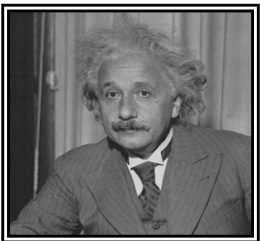
Max Planck
(1858 – 1947)

En introduisant le concept de « dualité onde-particule », la **mécanique quantique**, a permis de compléter la vision ondulatoire de la lumière par la **notion de quanta d'énergie**.

Une onde lumineuse de fréquence ν est constituée de photons dont l'énergie est quantifiée par:

$$E = h\nu = \hbar\omega$$

$$E(\text{eV}) \approx \frac{1240}{\lambda(\text{nm})}$$



Albert Einstein
(1879 – 1955)

$h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ Js}$: constante de Planck

$$\hbar = \frac{h}{2\pi}$$

Les ondes électromagnétiques

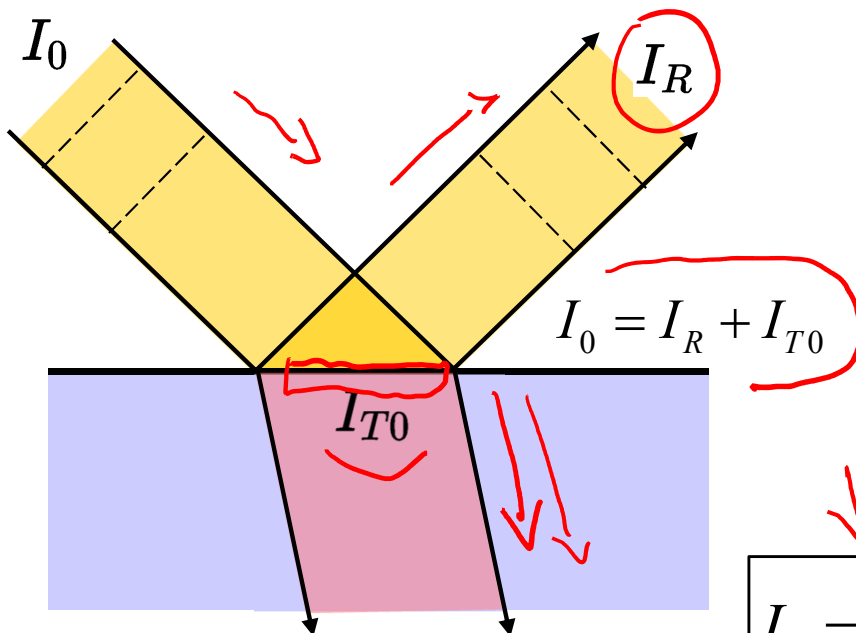
Lorsqu'une onde lumineuse arrive sur un matériau, **le champ électromagnétique interagit avec les charges contenues dans la matière** (électrons libres, dipôles). Il y a un échange d'énergie entre le champ et la matière. On distingue:

- ❑ **Interaction électronique**: le champ électromagnétique excite les **électrons** (libres ou liés (dipôles));
- ❑ **Interaction vibrationnelle**: l'onde peut aussi exciter des « modes de vibration » du cristal (**phonons**), des **liaisons** ou des **molécules** présentes.

Suivant le type de matériau et la fréquence de l'onde incidente, on distingue :

- La réflexion spéculaire ✓
- La diffusion ✓
- La transmission avec réfraction ✓
- L'absorption ✓
- Les interférences
- ...
- Et d'autres effets plus compliqués...

$$\vec{D} \cdot \vec{E} = \epsilon_0 \vec{E} \cdot \vec{E}$$



$$I_0 = c \cdot \epsilon_0 \cdot \langle |\vec{E}|^2 \rangle$$

Intensité lumineuse
(dans le vide)

$$\left[\frac{m}{s} \frac{J}{m^3} = \frac{J}{m^2 \cdot s} \right]$$

Indice de réfraction

Si le matériau n'est pas totalement réfléchissant (métaux), la partie de l'onde transmise dans le matériau a une **vitesse de propagation différente**: ceci induit une **réfraction** de la lumière.

La fréquence ν (énergie) restant constante, c'est la longueur d'onde qui varie dans le matériau. **L'indice de réfraction n** , qui dépend de ν , est défini comme:

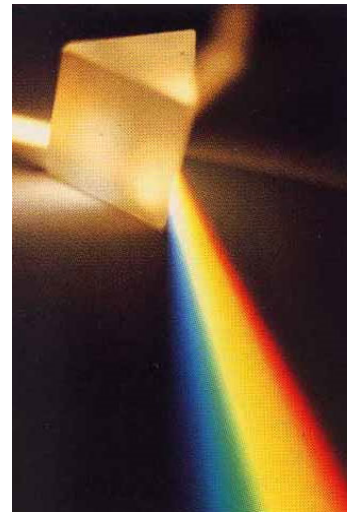
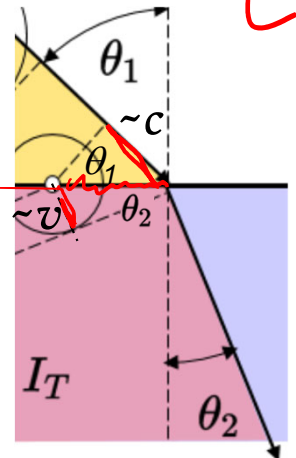
$$n(\nu) = \frac{c}{v(\nu)} = \frac{\lambda_{\text{air}}}{\lambda_{\text{mat}}(\nu)}$$

D'où la loi de la réfraction:

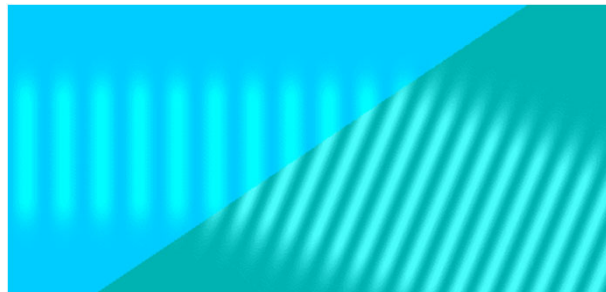
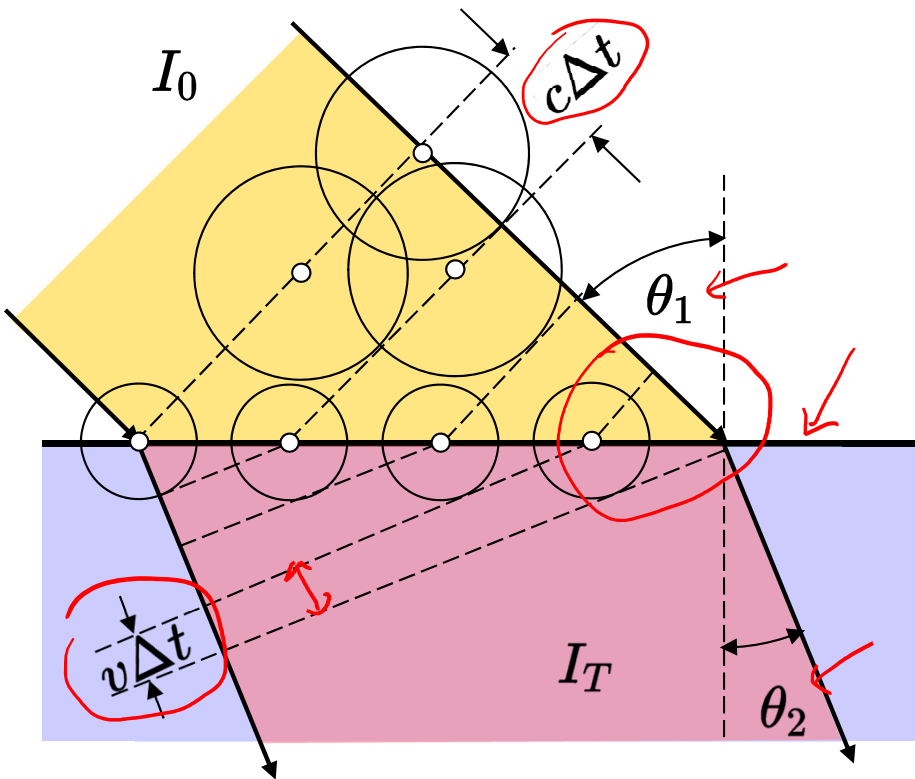
$$\frac{c}{\sin \theta_1} = \frac{v}{\sin \theta_2}$$

ou

$$\sin \theta_1 = n \sin \theta_2$$



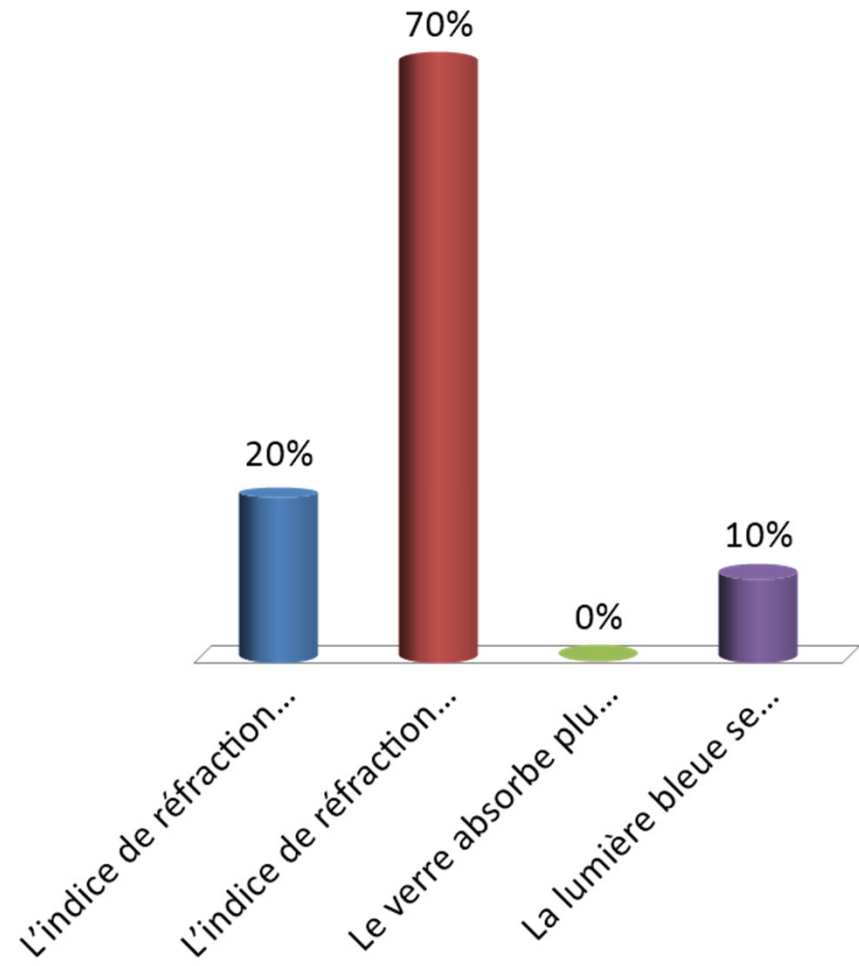
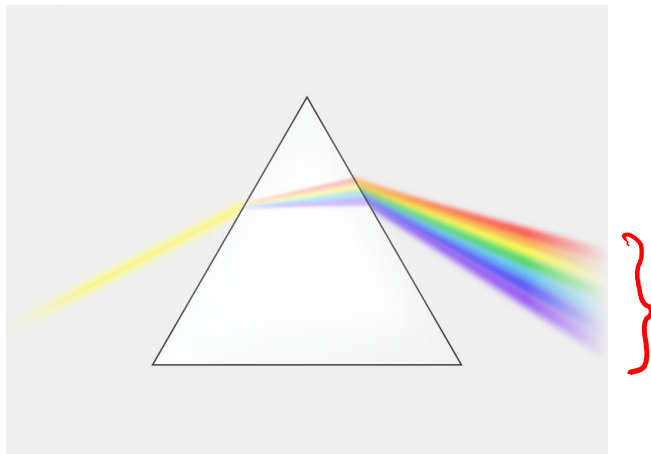
Changement de direction à l'interface



Compression du front d'ondes

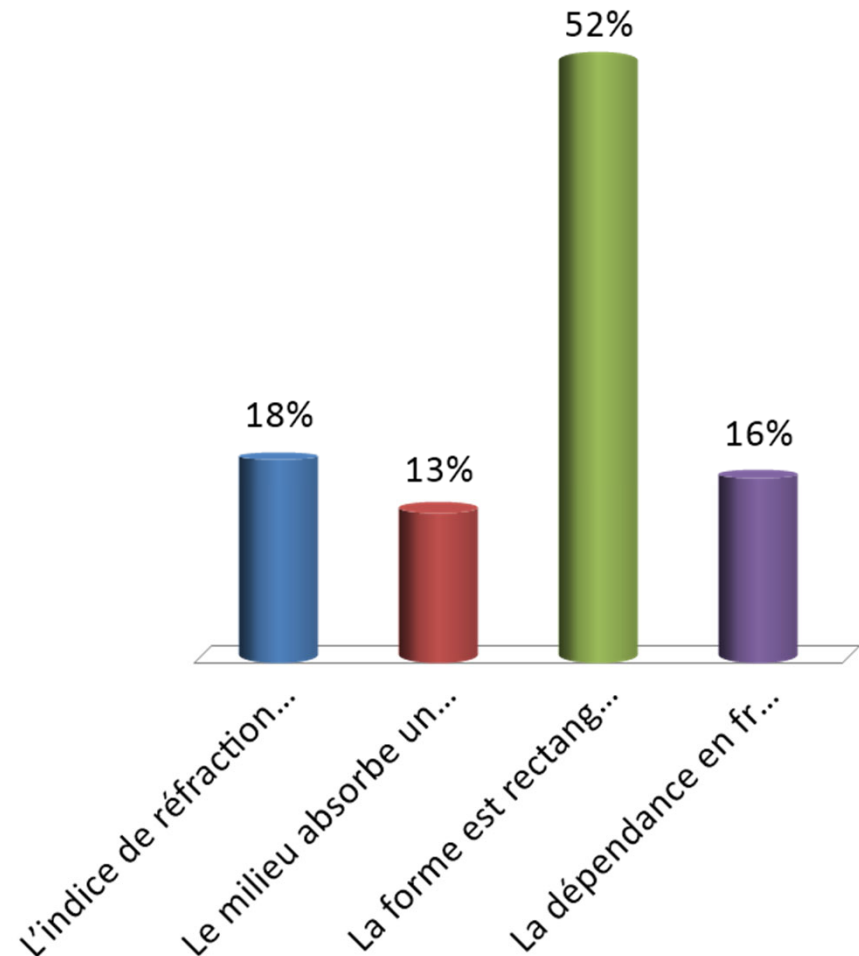
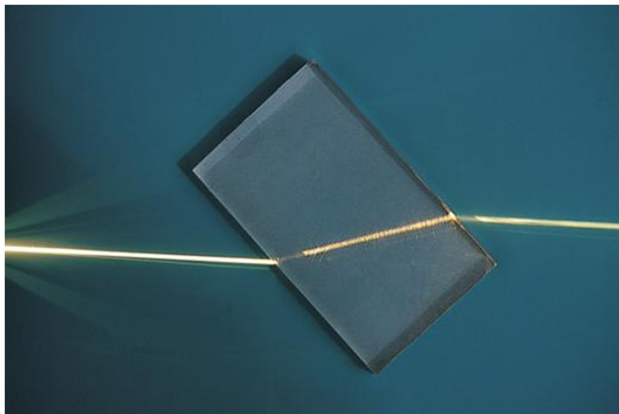
Dans un prisme triangulaire en verre, la lumière blanche est divisée en couleurs de l'arc-en-ciel. Pourquoi ?

- A. L'indice de réfraction dépend de l'angle d'incidence de la lumière
- B. L'indice de réfraction dépend de la fréquence
- C. Le verre absorbe plus la lumière rouge que la lumière bleue
- D. La lumière bleue se propage plus vite que la lumière rouge



Pourquoi la lumière blanche n'est-elle pas séparée en couleurs de l'arc-en-ciel dans le cas ci-dessous ?

- A. L'indice de réfraction n'est pas suffisamment élevé
- B. Le milieu absorbe une partie de l'intensité lumineuse
- C. La forme est rectangulaire
- D. La dépendance en fréquence de l'indice de réfraction n'est pas suffisante



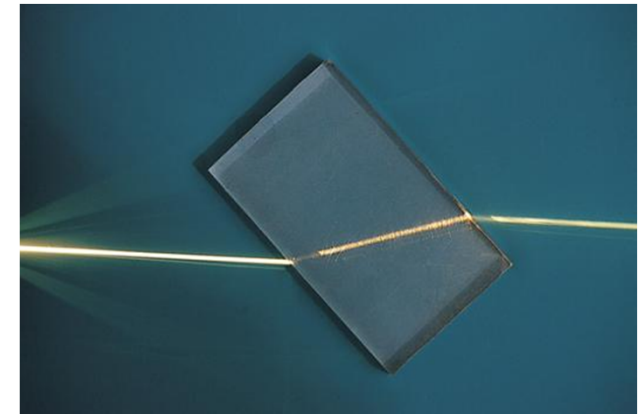
Indice de réfraction

La vitesse de propagation de l'onde dans un milieu (semi-)transparent est également déduite des équations de Maxwell... en considérant ϵ_r et μ_r

$$\vec{\nabla}^2 \vec{E} = \Delta \vec{E} = \underbrace{\epsilon_0 \epsilon_r \mu_0 \mu_r}_{v^{-2}} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

Mis à part les para- et ferromagnétiques qui sont quasi opaques, en tout cas dans le domaine optique, les matériaux (semi-)transparents ont $\mu_r \approx 1$ et donc:

$$v = (\epsilon_0 \epsilon_r \mu_0)^{-1/2} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{c}{n}$$



Plus ϵ_r est grand, plus un matériau peut se polariser. Ces dipôles vont interagir avec le champ qui va être «ralenti» dans le matériau, mais aussi réfléchi. L'indice de réfraction va définir l'énergie transmise et réfléchi à l'interface.

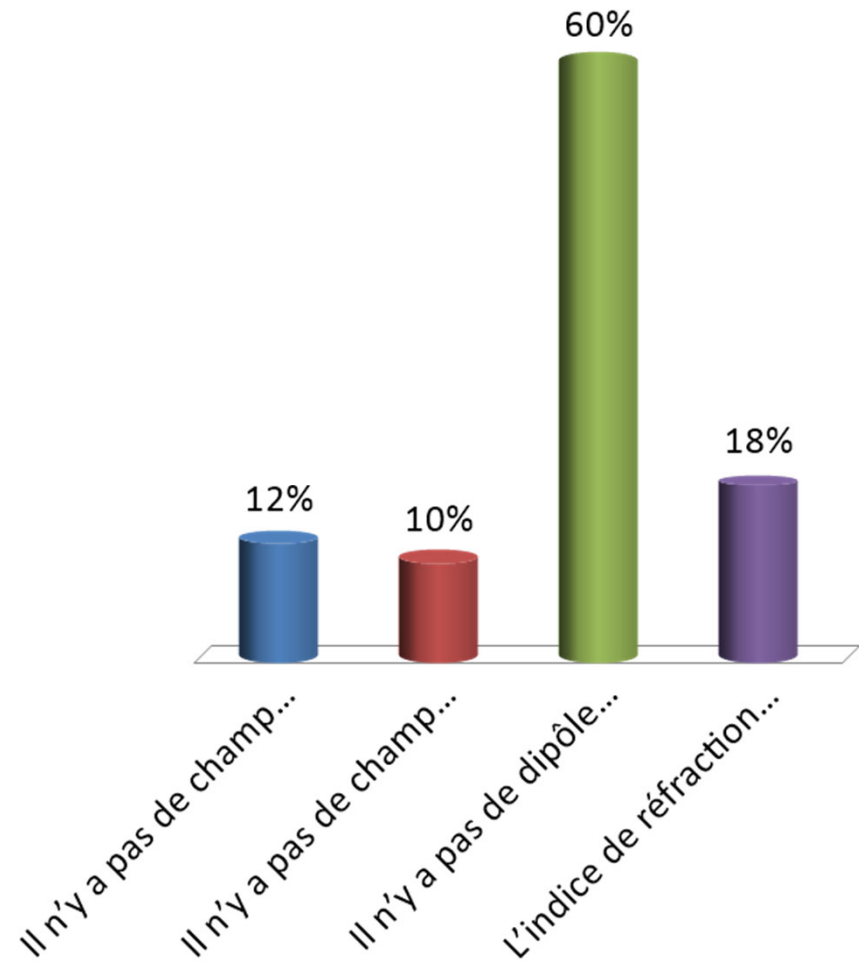
Pour une incidence normale, de l'air à un matériau d'indice de réfraction n :

$$R = \frac{I_R}{I_0} = \frac{\vec{E}_R^2}{\vec{E}_0^2} = \left(\frac{1-n}{1+n} \right)^2 \quad T = \frac{I_{T0}}{I_0} = \frac{\vec{E}_{T0}^2}{\vec{E}_0^2} = \frac{4n}{(1+n)^2}$$

réflexion transmission

Pourquoi la vitesse de la lumière est-elle maximale dans le vide, et toujours inférieure dans d'autres milieux ?

- A. Il n'y a pas de champ électrique dans le vide
- B. Il n'y a pas de champ magnétique dans le vide
- C. Il n'y a pas de dipôles électriques dans le vide
- D. L'indice de réfraction est toujours inférieur à 1



Propriétés optiques des métaux

Dans le cas des **métaux**, la lumière va faire **osciller le bain d' e^- libres** et être **absorbée** sur de très courtes distances. Cette oscillation réémet un faisceau de même fréquence, d'où une forte réflexion (et une transmission quasi-nulle, d'où l'opacité d'échantillons massifs).

Si la fréquence du signal est trop élevée, les électrons ne peuvent plus suivre l'oscillation du champ. Les métaux peuvent alors devenir **transparents au-dessus d'une certaine fréquence**.



acier inox



Al

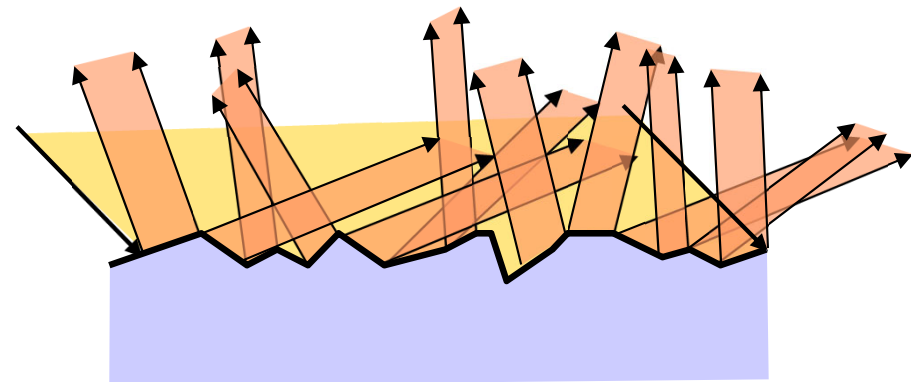


Cu



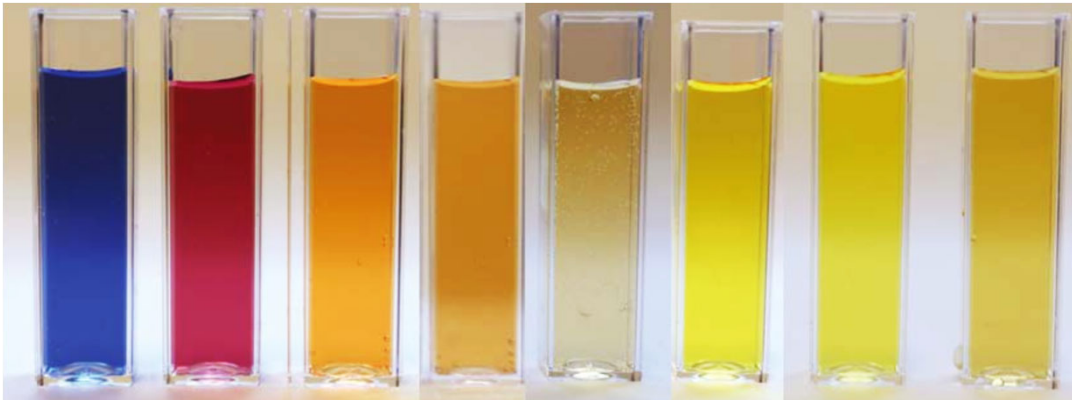
Au

La lumière est bien réfléchi sur une surface métallique polie, aspect miroir. Lorsque la surface est dépolie (rugueuse), la lumière est **diffusée**, aspect mat (déviations de trajectoire).

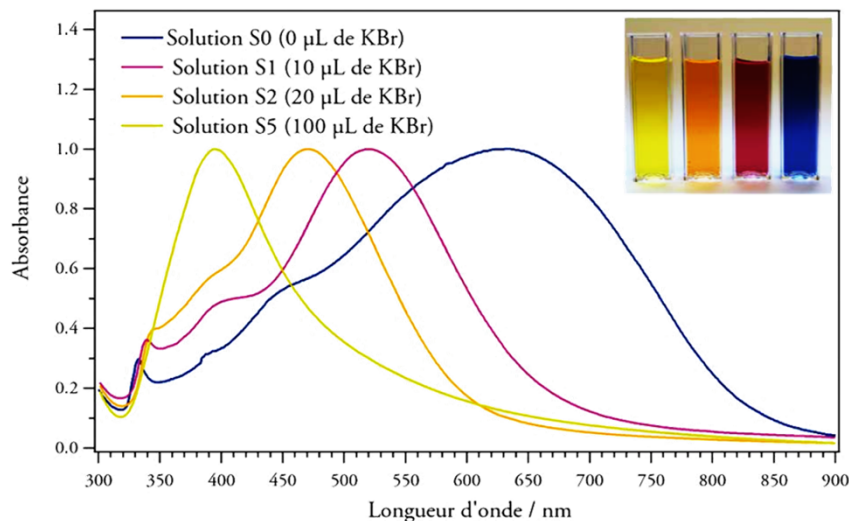


Propriétés optiques des métaux

Lorsque la **taille** de «l'objet» métallique devient de l'ordre de grandeur ou est plus petite que la **longueur d'onde** de la lumière, des phénomènes diffusifs plus complexes... et très beaux apparaissent (diffusion de Mie).



Suspension colloïdale de nanoparticules d'argent :
la couleur dépend de la taille



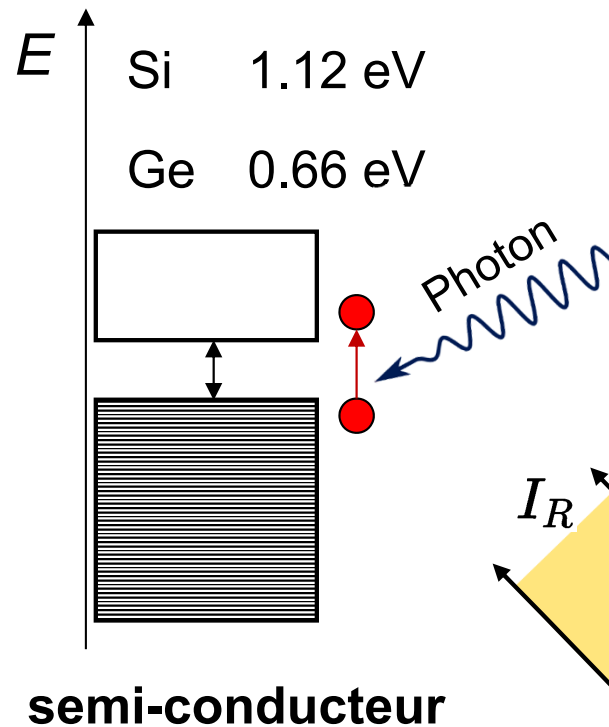
Coupe de Lycurgus (400 ans AC) observée en réflexion (vert) et en transmission (rouge). Elle contient des nanoparticules d'or et d'argent.

Propriétés optiques des semi-conducteurs

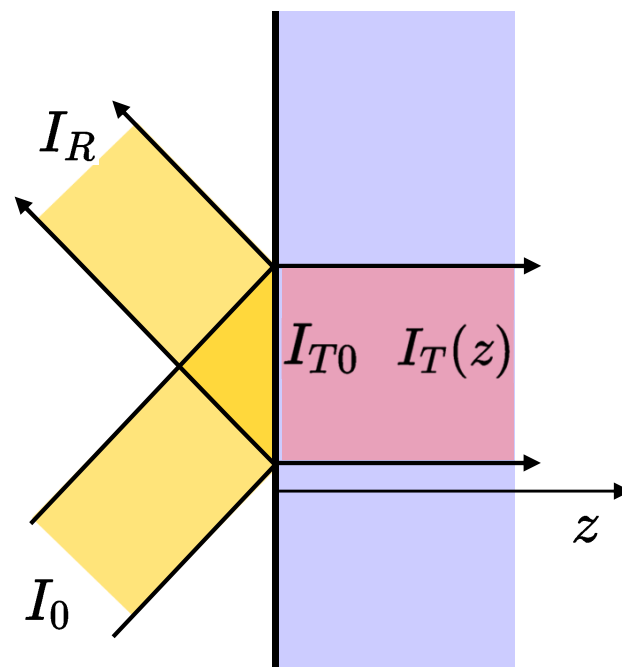
Les semi-conducteurs ont un comportement optique qui dépend fortement de la longueur d'onde (ou de **l'énergie**) des **photons**. En effet, si :

$$h\nu \geq E_g$$

un **électron** de la bande de valence peut être excité **dans la bande de conduction** (d'où une absorption sélective).



Une onde incidente est en partie **réfléchi**e et la **partie transmise** dans le matériau est **absorbée** sur de très courtes distances pour un semi-conducteur (fonction de la longueur d'onde).



L'**absorption** décrit l'atténuation de l'onde transmise en fonction de la distance parcourue dans le matériau.

Propriétés optiques: semi-conducteurs

Le **coefficient d'absorption** représente la **probabilité** qu'un **photon** soit **absorbé** dans le matériau par unité de distance parcourue.

L'intensité lumineuse est donnée par le produit du flux de photons ϕ et de l'énergie $h\nu$ porté par chaque photon. Ainsi, l'intensité entrant dans le matériau est donnée par:

$$I_{T0} = \phi_0 \times h\nu \quad \left[\frac{\#}{m^2 \cdot s} \times J = \frac{J}{m^2 \cdot s} \right]$$

Si le flux de photons perdus entre z et $(z + dz)$ est :

$$\delta\phi = \phi(z + \delta z) - \phi(z) = -\alpha\phi(z)\delta z$$

Le coefficient α est le coefficient d'absorption [m^{-1}]

Alors :

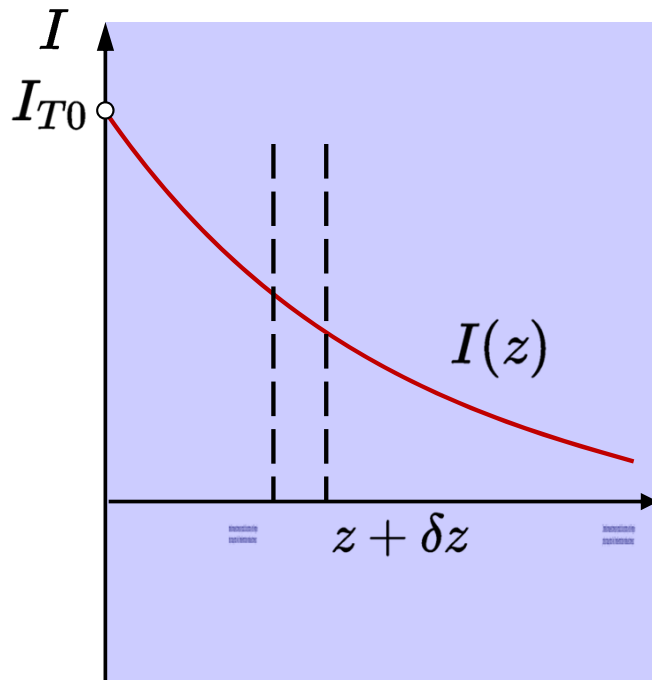
$$\frac{d\phi}{dz} = -\alpha\phi(z)$$

Dont la solution donne, après multiplication par $h\nu$:

$$I(z) = I_{T0} \exp(-\alpha z)$$

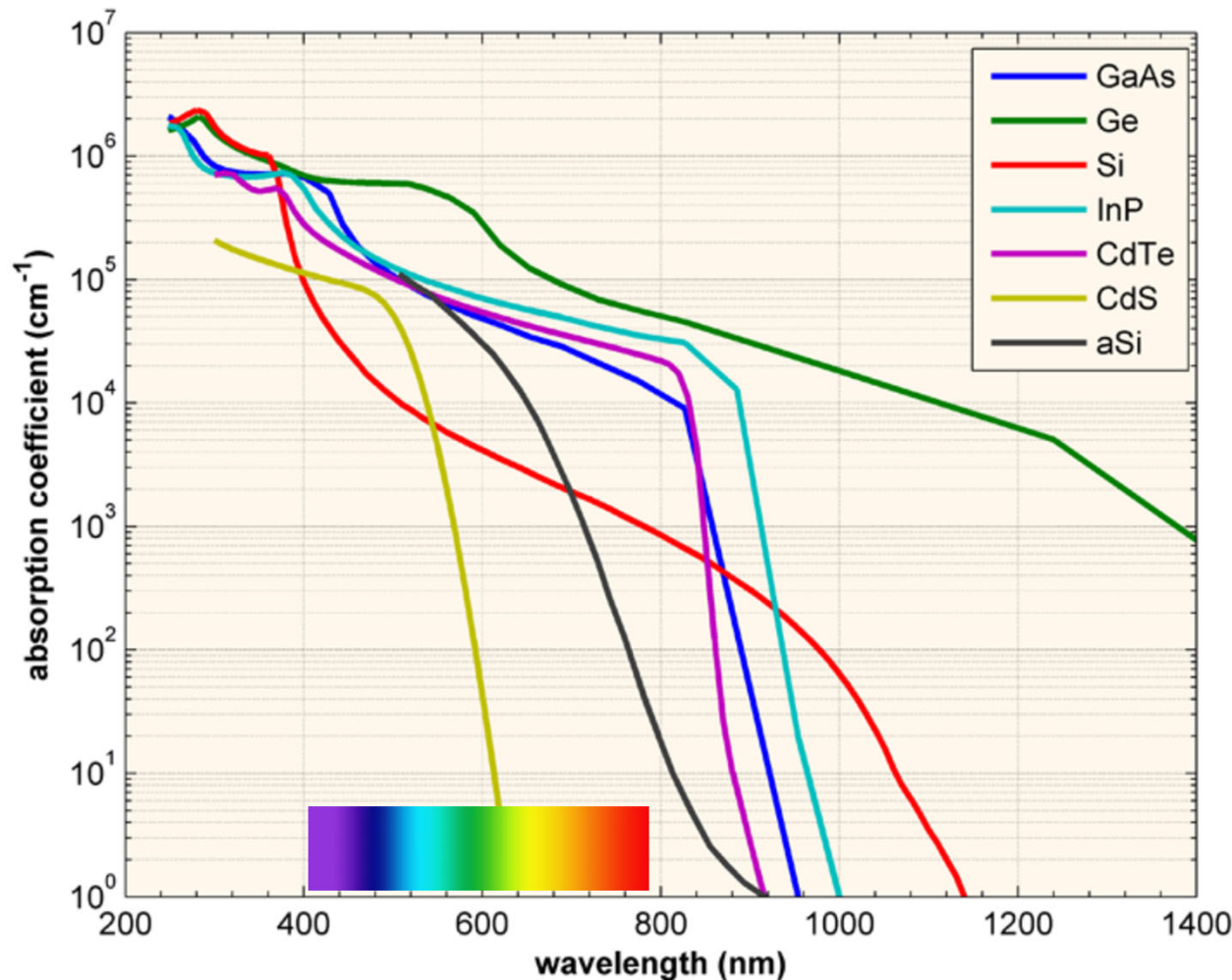
Loi de Lambert-Beer

$$\Delta z = \frac{\ln 2}{\alpha} \quad \text{Distance caractéristique pour un flux divisé par 2}$$



Propriétés optiques: semi-conducteurs

Le coefficient d'absorption dépend de la longueur d'onde. Dans le domaine visible, la lumière est très fortement atténuée sur des distances très courtes pour la plupart des **semiconducteurs**.



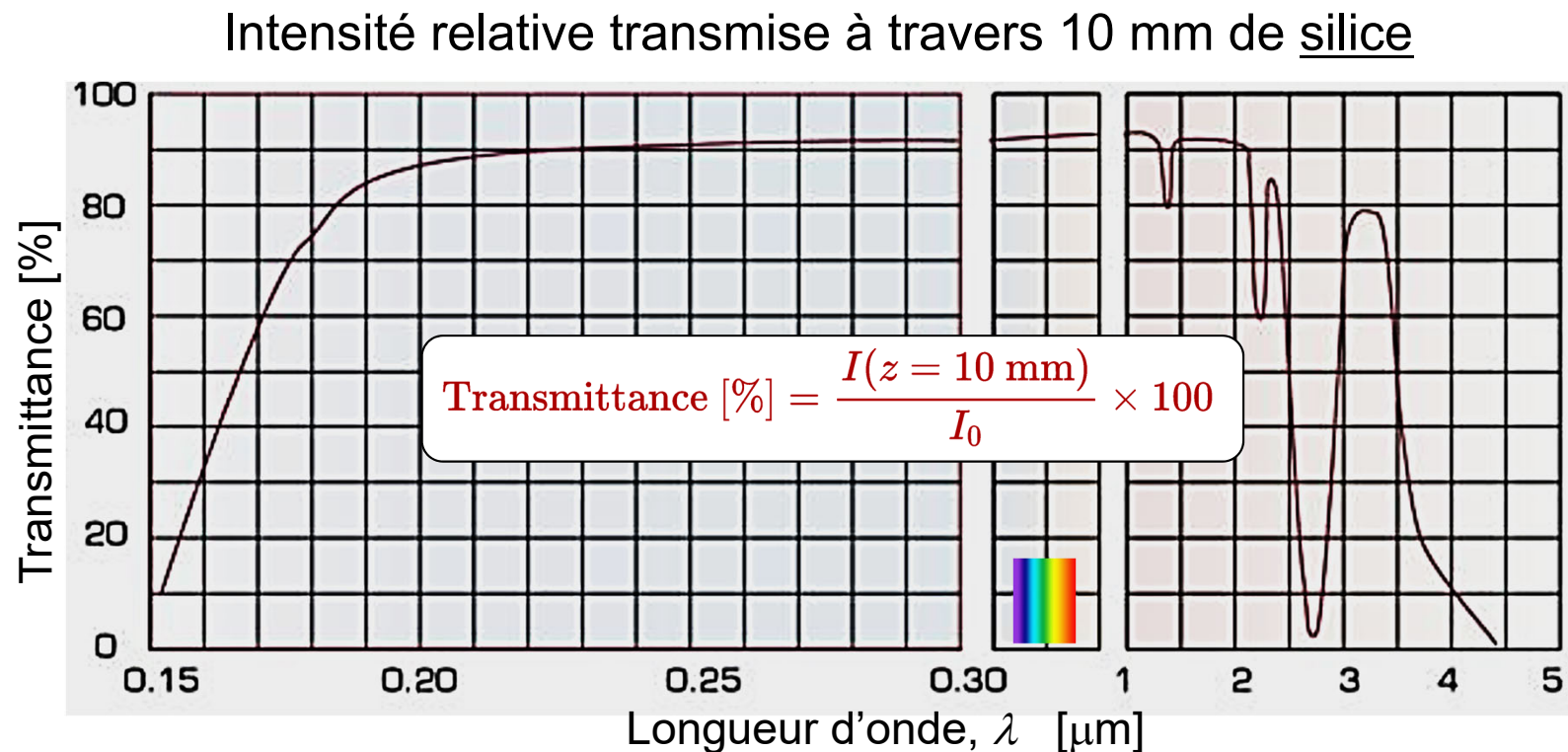
$$\Delta z = \frac{\ln 2}{\alpha}$$

Distance caractéristique
pour un flux divisé par 2

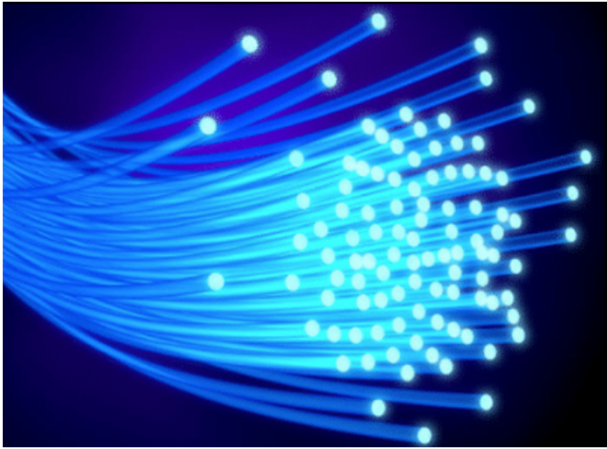
Propriétés optiques: diélectriques

Pour les **matériaux isolants**, le gap d'énergie entre bande de valence et bande de conduction est plus grand que l'énergie des photons visibles (1.5 – 3 eV). Ces matériaux sont donc pour la plupart **transparents**.

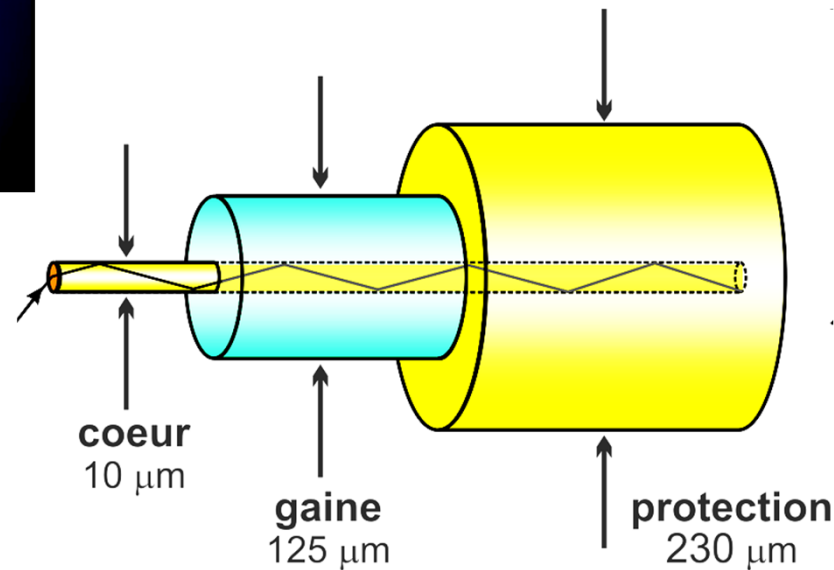
Aux longueurs d'onde plus grandes (**fréquences plus faibles**) dans l'infrarouge (**IR**), certaines fréquences sont absorbées car elles correspondent aux fréquences de **vibrations des liaisons, des molécules ou du cristal**.



Propriétés optiques: diélectriques



Les **fibres optiques en silice** permettent de transmettre à la vitesse de la lumière de l'information sur de grandes distances.



$$\alpha_{\text{dB}}[\text{dB/km}] = \frac{-10}{z} \log \frac{I(z)}{I_0} = (10 \log e) \alpha [\text{km}^{-1}]$$

$$3 \text{ dB} : I \cong 0.5 I_0$$

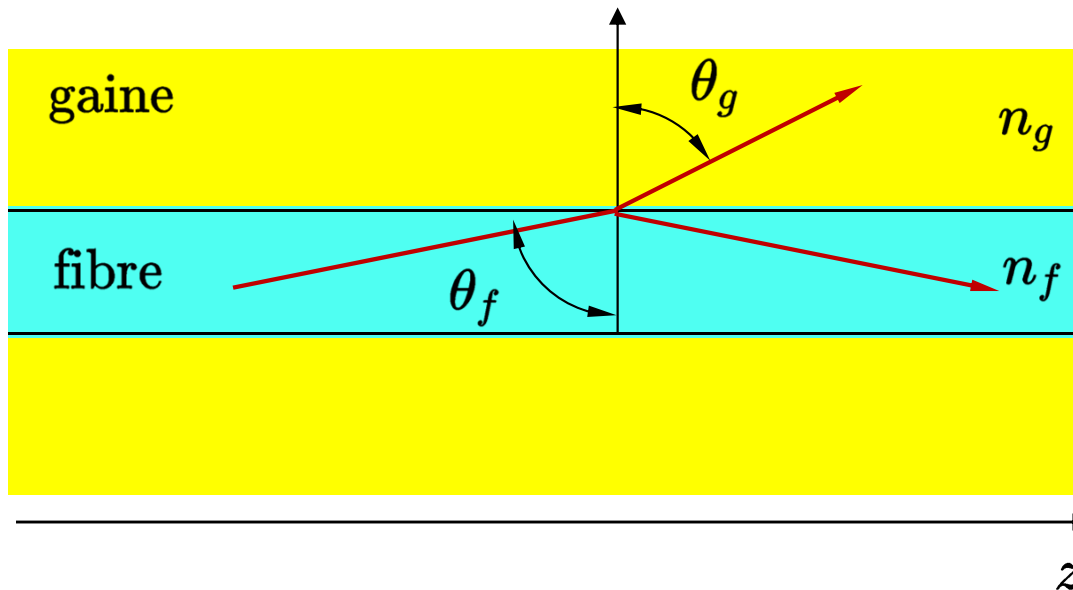
Année	dB/km	λ (nm)
1970	20	
1974	2 - 3	1 060
1976	0.47	1 200
1979	0.20	1 550
1986	0.154	1 550
2002	0.1484	1 570

http://fr.wikipedia.org/wiki/Fibre_optique

Fibre à **saut d'indice**: l'indice de réfraction change brutalement entre le cœur et la gaine. Le **cœur** a un indice **plus élevé** que la **gaine**: **réflexion totale interne**.

Propriétés optiques: fibres optiques

La **réflexion totale** interne est à la base de la transmission optique dans les fibres pour la télécommunication.



Afin de **guider les rayons lumineux** pour qu'ils restent confinés dans la fibre, on utilise un verre différent pour la gaine et la fibre.

La loi de la réfraction est telle que:

$$n_f \times \sin(\theta_f) = n_g \times \sin(\theta_g)$$

Pour que le faisceau, pas précisément parallèle à l'axe de la fibre, reste dans celle-ci, il faut qu'il n'y ait **pas de solution pour le faisceau transmis** dans la gaine, où $\theta_g < \pi/2$

L'angle critique θ_f est alors tel que : $\sin(\theta_f) = \frac{n_g}{n_f}$

Définit une dispersion angulaire du faisceau : les angles supérieurs à l'angle critique sont en réflexion totale

$$\begin{aligned} \sin(\theta_g) &= \sin(\theta_f) \times \frac{n_f}{n_g} > 1 \\ \Rightarrow \sin(\theta_f) &> \frac{n_g}{n_f} \end{aligned}$$

Propriétés optiques: diélectriques

La plupart des diélectriques sont **transparents**, mais peuvent absorber sélectivement une fréquence lorsque l'énergie correspond précisément à une **transition** d'un **niveau électronique** à un autre, par exemple lorsqu'ils sont **dopés** avec des impuretés.



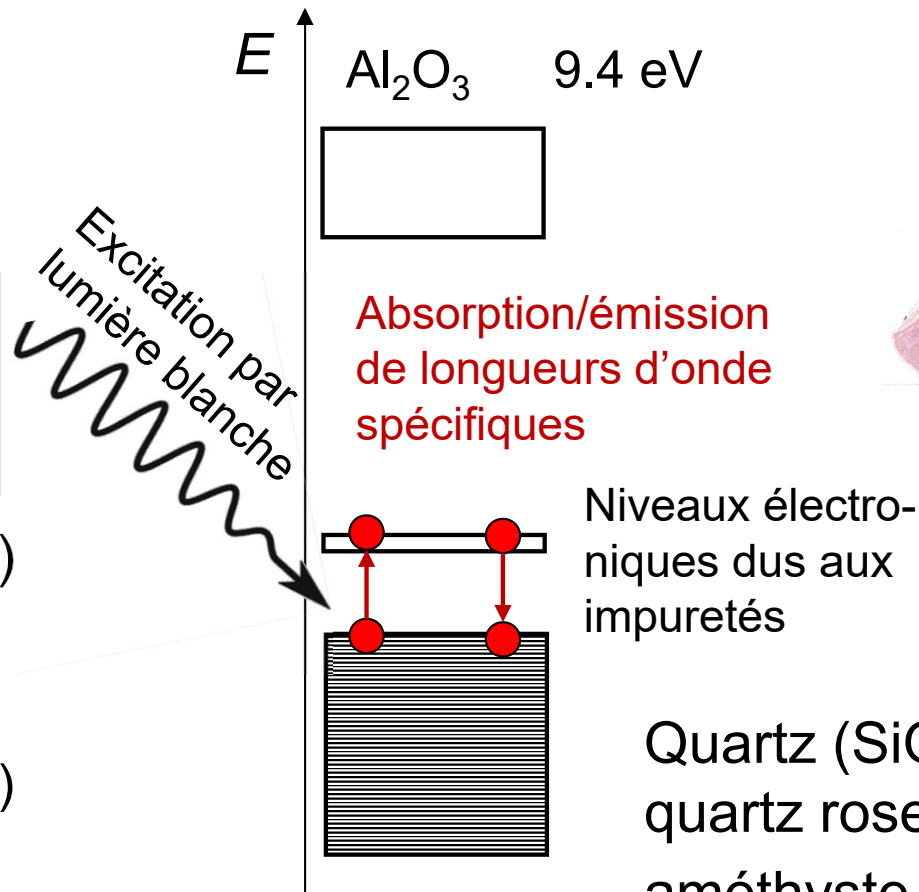
Corindon dopé (Al_2O_3)
avec divers éléments

Rouge : Cr (rubis)

Bleu: Ti, Fe (saphire)

Violet: V

Jaune: Fe

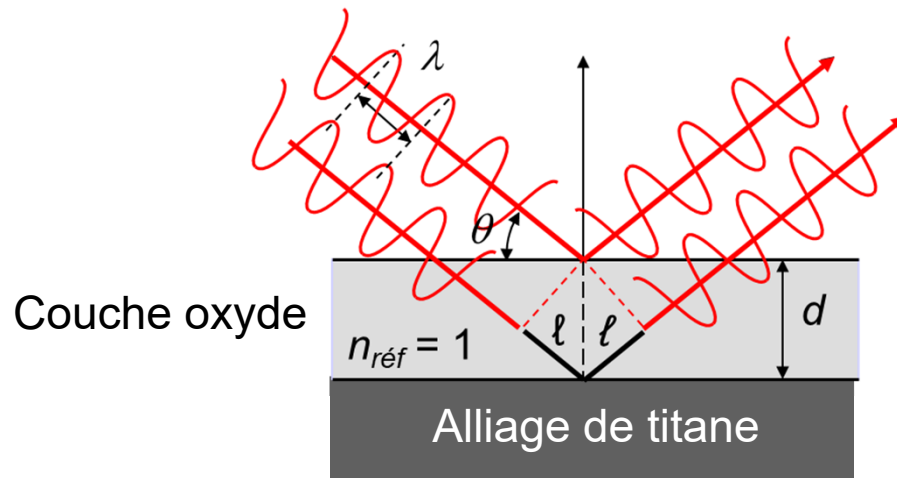


Quartz (SiO_2),
quartz rose et
améthyste



Propriétés optiques

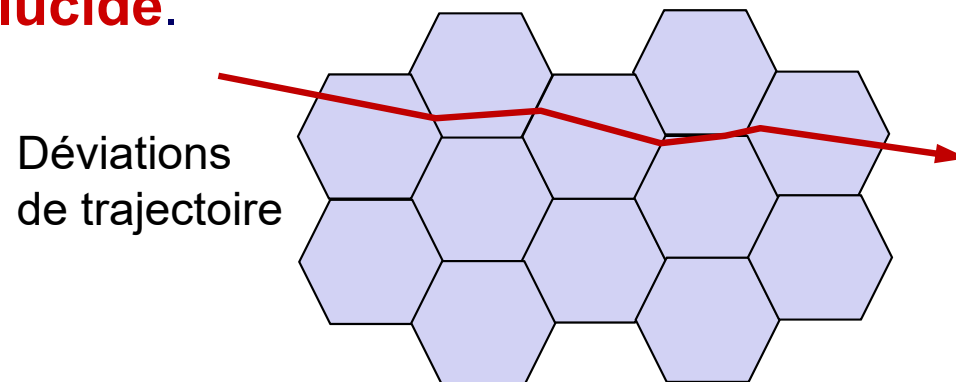
Une couche d'oxyde sur la surface d'un alliage titane crée des **interférences** similaires à ce qui a été vu pour la diffraction.



http://pat-et-do-chevalier.fr/couteaux_industriels.htm

$$2\ell = 2d \sin \theta = n\lambda$$

Les joints de grains d'un matériau cristallin transparent diffusent la lumière, rendant le matériau **translucide**.



P. Bowen, <http://ltp.epfl.ch/page71046-fr.html>

Résumé

- La lumière est une **onde électromagnétique**, la lumière visible correspondant à des longueurs d'onde comprises entre environ 400 et 770 nm. Elle peut aussi s'interpréter comme un **faisceau de photons** d'énergie donnée. La relation entre l'énergie d'un photon et sa fréquence (ou longueur d'onde) est donnée par:

$$E = h\nu = \hbar\omega \qquad \omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi c}{\lambda} \qquad E(\text{eV}) \approx \frac{1240}{\lambda(\text{nm})}$$

- Une onde incidente sur un matériau peut être réfléchie, transmise, réfractée, absorbée, diffusée... Elle **interagit avec la matière** par l'intermédiaire des **électrons** (libres ou liés), ainsi que des **liaisons**, ou **vibrations** (phonons) du cristal.
- Les **métaux** sont **opaques** car toute lumière incidente excite le bain d'électrons et se trouve ainsi absorbée sur une profondeur très faible (quelques nanomètres). Cette excitation (de surface) réémet une onde électromagnétique de même fréquence, d'où leur **forte réflexion optique**.
- Pour la plupart des matériaux **transparents** (ou semi-transparentes), $\mu_r \approx 1$ et l'indice de réfraction varie alors approximativement comme $\varepsilon_r^{1/2}$. Leur couleur dépend de mécanismes complexes d'absorption/émission de photons avec des interactions élastiques ou inélastiques photon-électron.