

# Introduction à l'optique



- L'optique est réputée être un sujet difficile ...  
... à enseigner

(ex. <http://www.physics.umd.edu/perg/papers/redish/talks/light.htm>)

*Seeing the Light:*

*What's so hard about teaching optics?*



Edward F. Redish  
University of Maryland

# Mais en fait l'optique n'est pas si difficile, par contre ...

- Son assimilation demande une capacité d'**abstraction** plus développée que pour d'autres branches de l'ingénierie.
- En effet, apprendre l'optique demande de maîtriser plusieurs théories différentes et en partie contradictoires, dont on saura utiliser pragmatiquement les résultats dans leurs domaine d'application respectif:
  - Optique géométrique
  - Optique ondulatoire
  - Optique quantique
  - etc.
- Mais en même temps il faut rester conscient **qu'aucune de ces théories n'est «exacte»**.

# Approche pédagogique

- Apprendre les bases des **théories** de la propagation de la lumière et de son interaction avec la matière. On va faire:
  - Durant les 3-4 premières semaines du cours un survol général des bases de l'optique et des concepts et formules plus utiles.
  - Ensuite des approfondissements sur les chapitres principaux: systèmes optiques, fibres, interférence, diffraction et spectrographie, etc.
- Assimiler et utiliser les approximations théoriques de l'optique géométrique et ondulatoire, en mettant l'accent sur:
  - **L'intuition physique**, appuyée à la fois sur les **formulations mathématiques** sous-jacentes et sur des démonstrations virtuelles et pratiques:
    1. **Applets**: démonstrations du « fonctionnement » de l'optique
    2. **Explorations** des principes et formules avec Excel et Matlab
    3. **Manips** de laboratoire
  - Des **exercices** et des calculs simples mais réalistes sur les systèmes optiques de base.
- Etudier les instruments optiques fondamentaux et «historiques», mais aussi assimiler les éléments et le fonctionnement des systèmes optiques modernes, tels qu'on les rencontre partout dans l'industrie et les biens de consommation et d'investissement.

# Brève histoire de l'optique

- Grèce ancienne
  - Heron d'Alexandrie: les rayons émergent des yeux
- Moyen âge
  - Ibn al-Haytham (Alhacen) (965-1040) contredit cette théorie
  - Lentilles inventées en Italie (~1320)
  - Dès ~1400: Della Porta, da Vinci, Galilée, Descartes, Kepler formulent l'optique géométrique, expliquent le fonctionnement des lentilles, construisent des instruments optiques
- Newton et Huygens

# Brève histoire de l'optique (2)

- 18ème – 19ème siècles
  - Fresnel, Young observent la diffraction
  - Maxwell (équations électromagnétiques), Hertz (antennes)
  
- 20ème siècle
  - Théorie quantique explique le dualisme onde-particule
  - Invention de l'holographie (1948)
  - Invention du laser (1960)
  - Dés les années 60-70: prolifération d'applications optiques

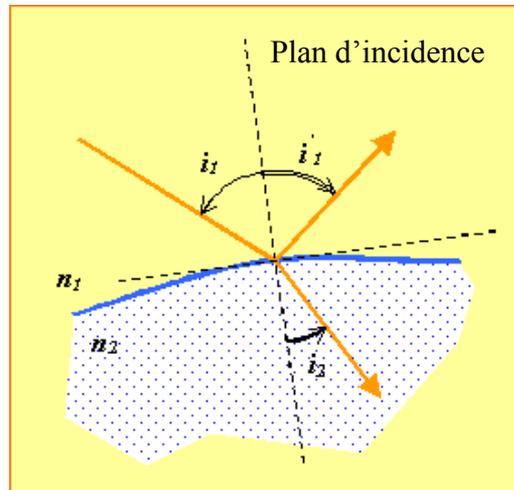
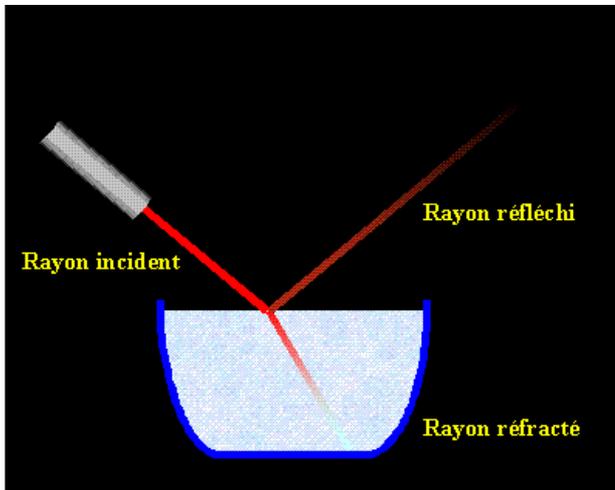
# La lumière

- Est une forme d'énergie électromagnétique
- Se transmet à travers des particules: photons
  - Comportement balistique, ex. ombres
- Se transmet à travers des ondes électromagnétiques
  - Ex. interférence, diffraction
- La mécanique quantique réconcilie les deux interprétations

# La propagation de la lumière

Principe de la propagation rectiligne de la lumière  
notions de "rayon " et de "faisceau" lumineux

## Réfraction, Réflexion



$i_1 = \text{angle d'incidence}$

$i'_1 = \text{angle de réflexion}$

$$i_1 = -i'_1$$

$i_2 = \text{angle de réfraction}$

$n_1 \text{ et } n_2 = \text{indices de réfraction}$

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = n_{2,1} = \frac{n_2}{n_1}$$

$$n = \frac{c}{V}$$

$V = \text{vitesse de la lumière dans le milieu}$

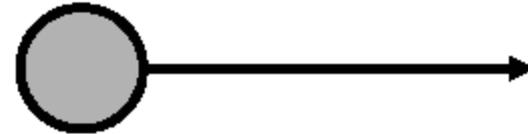
$c = \text{vitesse de la lumière dans le vide}$

Lois de Descartes (1596-1650)

- Le rayon réfléchi et le rayon réfracté sont dans le plan d'incidence
- Les angles d'incidence et de réflexion sont égaux et de signes contraires
- Pour chaque lumière monochromatique, les sinus des angles d'incidence et de réfraction sont dans un rapport constant.

# Propriétés corpusculaires de la lumière

- Photon = particule élémentaire de lumière
  - Mass = 0
  - vitesse  $c = 3 \times 10^8$  m/sec



- Energie  $E = h\nu$ 
  - $h$  = constant de Planck =  $6.6262 \times 10^{-34}$  J sec
  - $\nu$  est la fréquence des ondes lumineuses

Décrit la nature duale onde-particule de la lumière (et en fait introduit l'optique quantique ...)

# Dispersion de la lumière

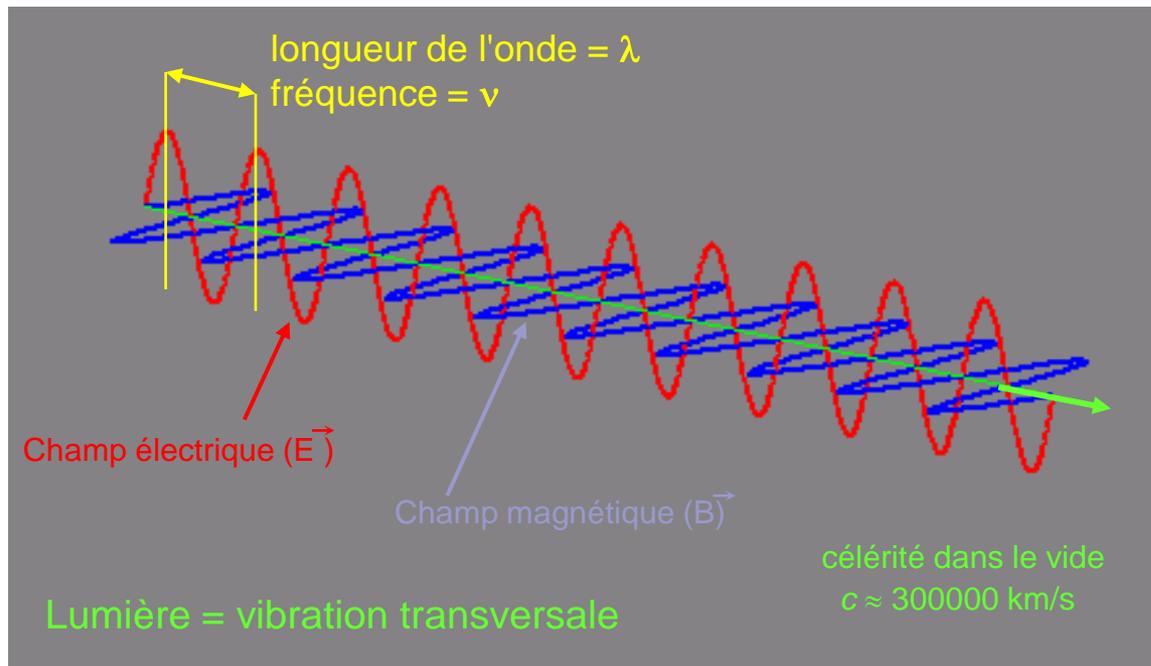
Newton (1672) : La lumière blanche se décompose en lumières colorées



# Nature ondulatoire de la lumière

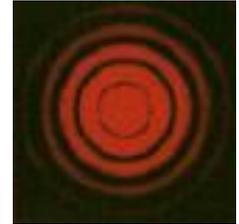
Huygens (1629-1695): la lumière est constituée de particules dont le mouvement oscillatoire se transmettent de proche en proche. L'ensemble des particules qui vibrent ensemble constituent une ondelette.

## Théorie électromagnétique de Maxwell (1864)

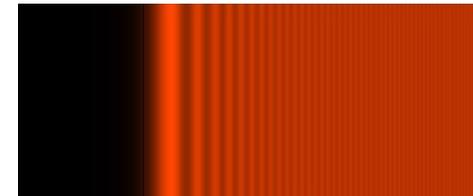


# La lumière ne se déplace pas toujours en ligne droite !

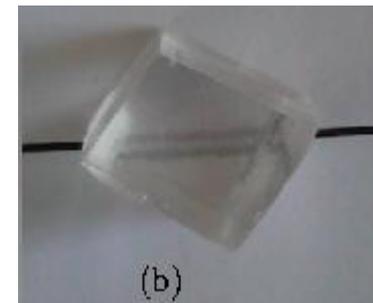
- Diffraction de la lumière à travers une ouverture circulaire



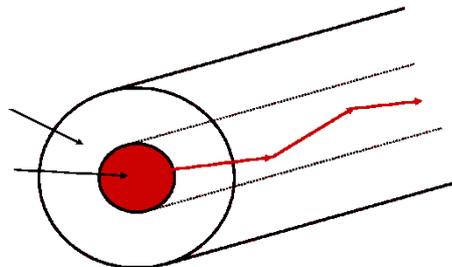
- Diffraction de la lumière par un bord d'écran rectiligne



- Biréfringence de la lumière dans les cristaux

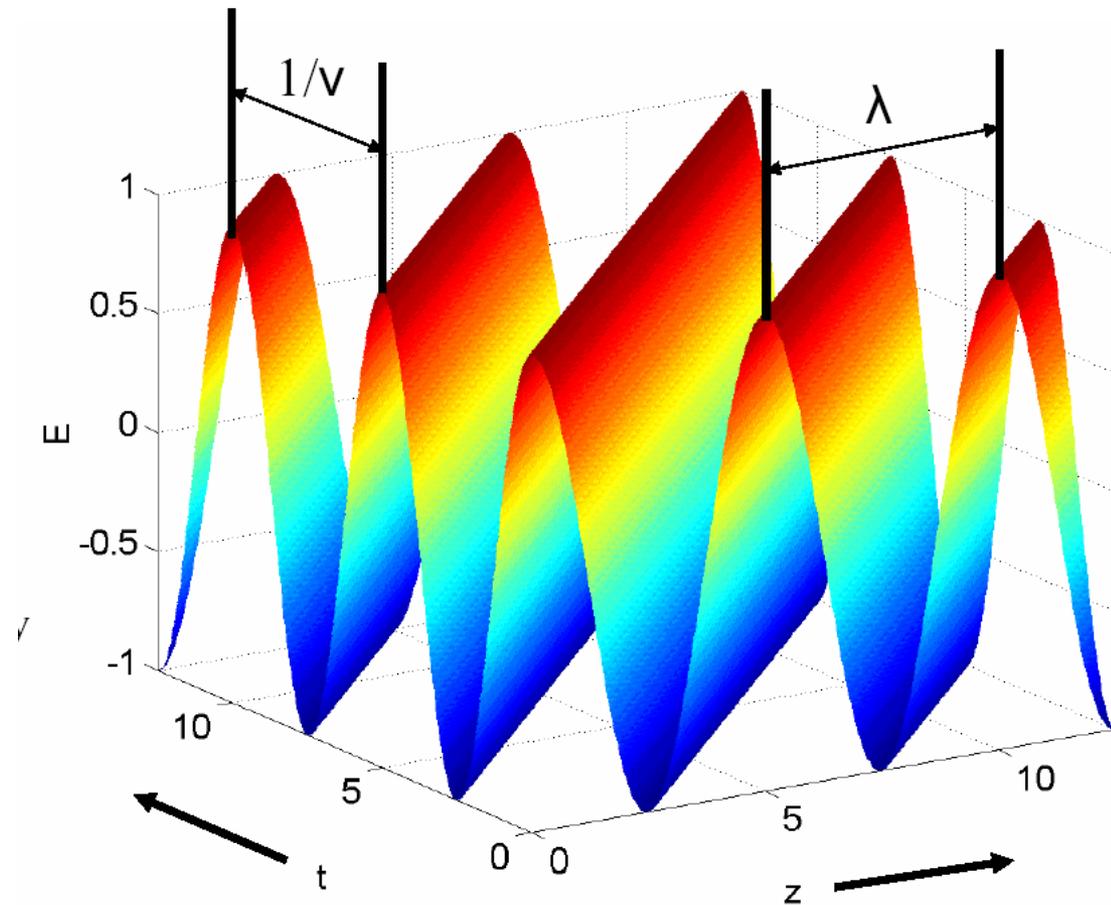


- Fibres optiques

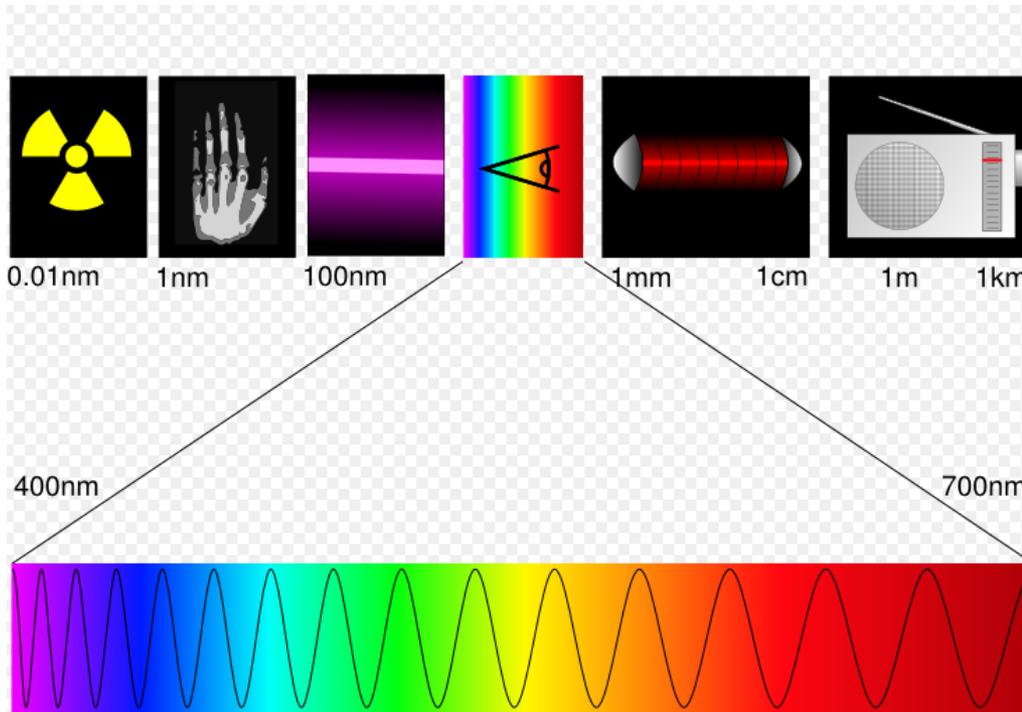


# Propriétés ondulatoires de la lumière

- $\lambda$  : longueur d'onde
- $K = 2\pi/\lambda$  nombre d'onde
- $\nu$  : fréquence temporelle
- $\omega = 2\pi\nu$  fréquence angulaire
- $E$  : champ électrique



# Spectre électromagnétique

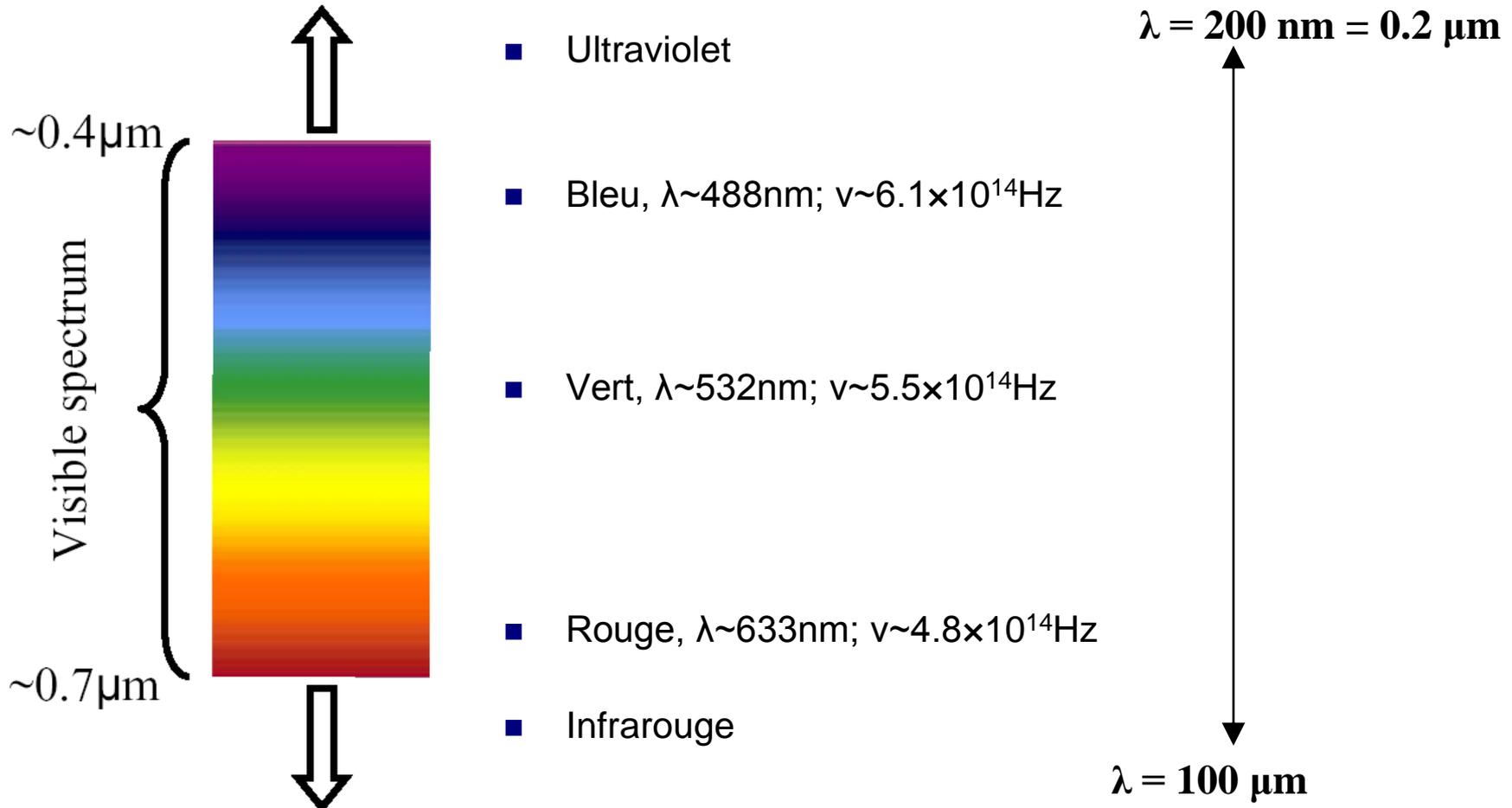


Longueur d'onde	Domaine
> 10 cm	<a href="#">Radio</a>
De 3 mm à 10 cm	<a href="#">Micro-onde</a> et <a href="#">radar</a>
De 300 $\mu\text{m}$ à 3 mm	<a href="#">Terahertz</a>
De 1 $\mu\text{m}$ à 300 $\mu\text{m}$	<a href="#">Infrarouge</a>
De 400 nm à 700 nm	<a href="#">Lumière visible</a>
De 10 nm à 400 nm	<a href="#">Ultraviolet</a>
De $10^{-8}$ m à $10^{-7}$ m	<a href="#">Rayon X</a>
De $10^{-11}$ m à $10^{-8}$ m	<a href="#">Rayon X</a>
De $10^{-14}$ m à $10^{-11}$ m	<a href="#">Rayon <math>\gamma</math></a>

Le domaine de l'optique:

## le spectre EM de l'ultraviolet à l'infrarouge

et selon les applications, aussi des rayons X aux micro-ondes

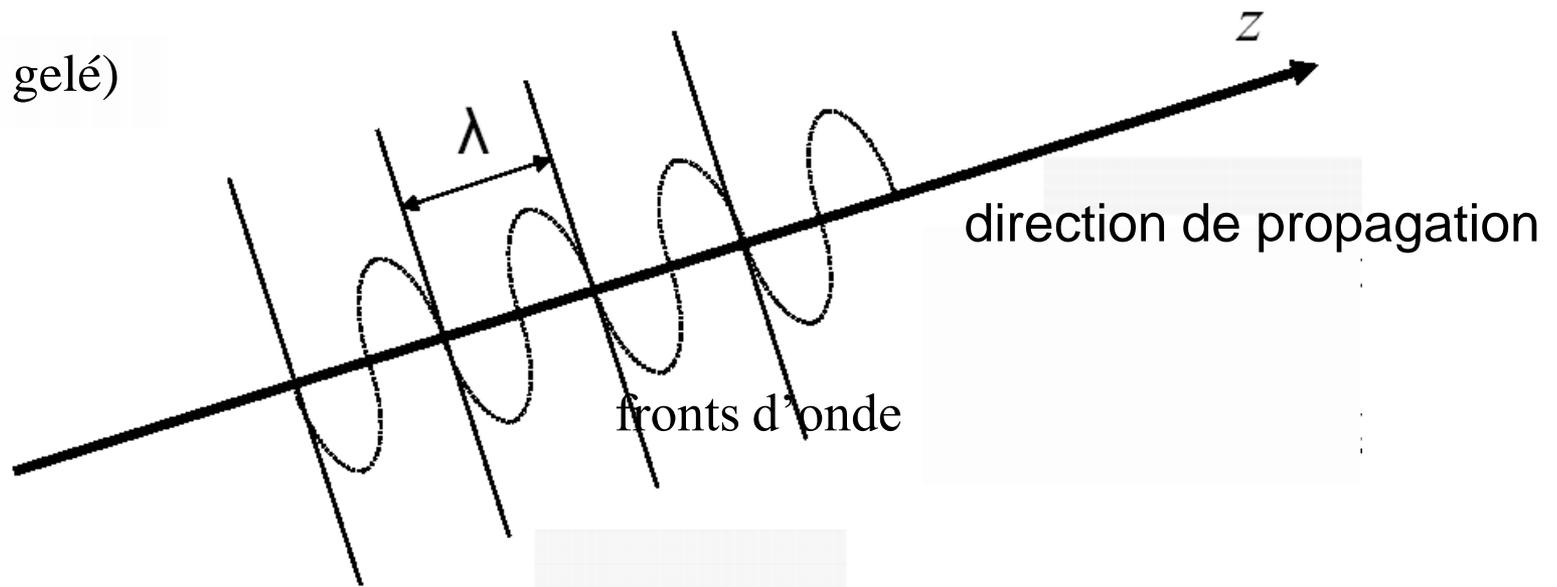


Applet: <http://www.gel.ulaval.ca/~mbusque/spectre/>

# Rayons lumineux

Propagation de la lumière monochromatique  
dans le vide ou dans un milieu homogène

$t=0$   
(temps gelé)

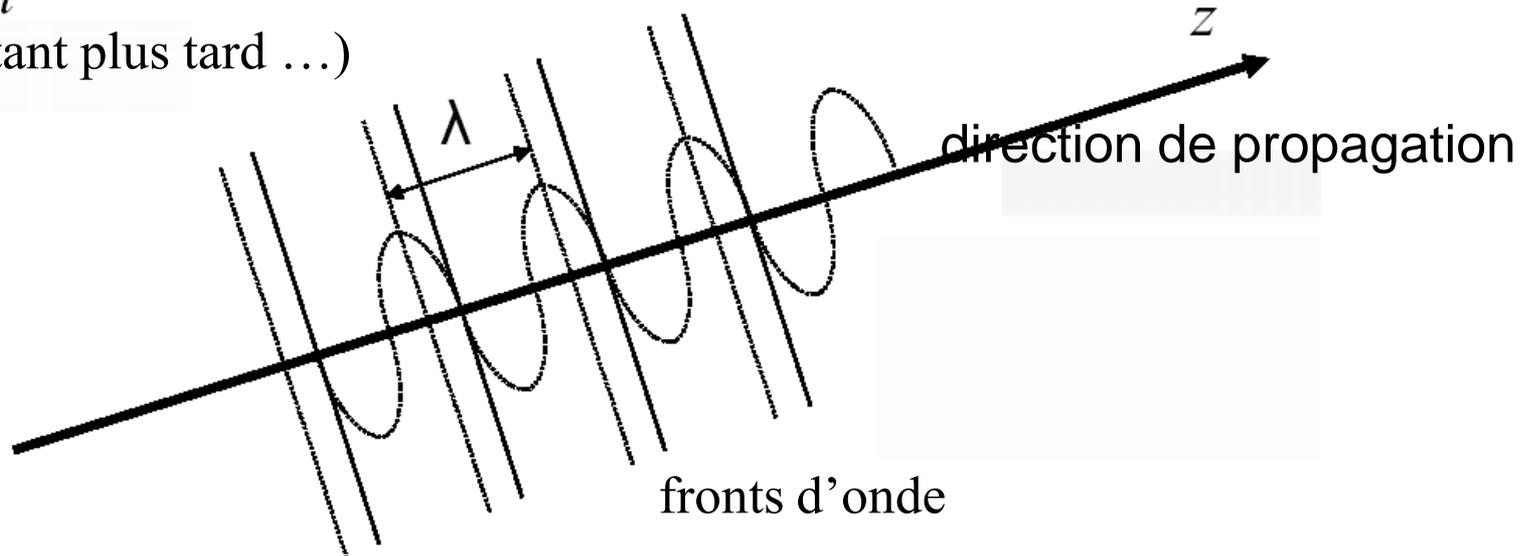


Dans un milieu homogène la lumière se propage selon un chemin rectiligne

# Rayons lumineux

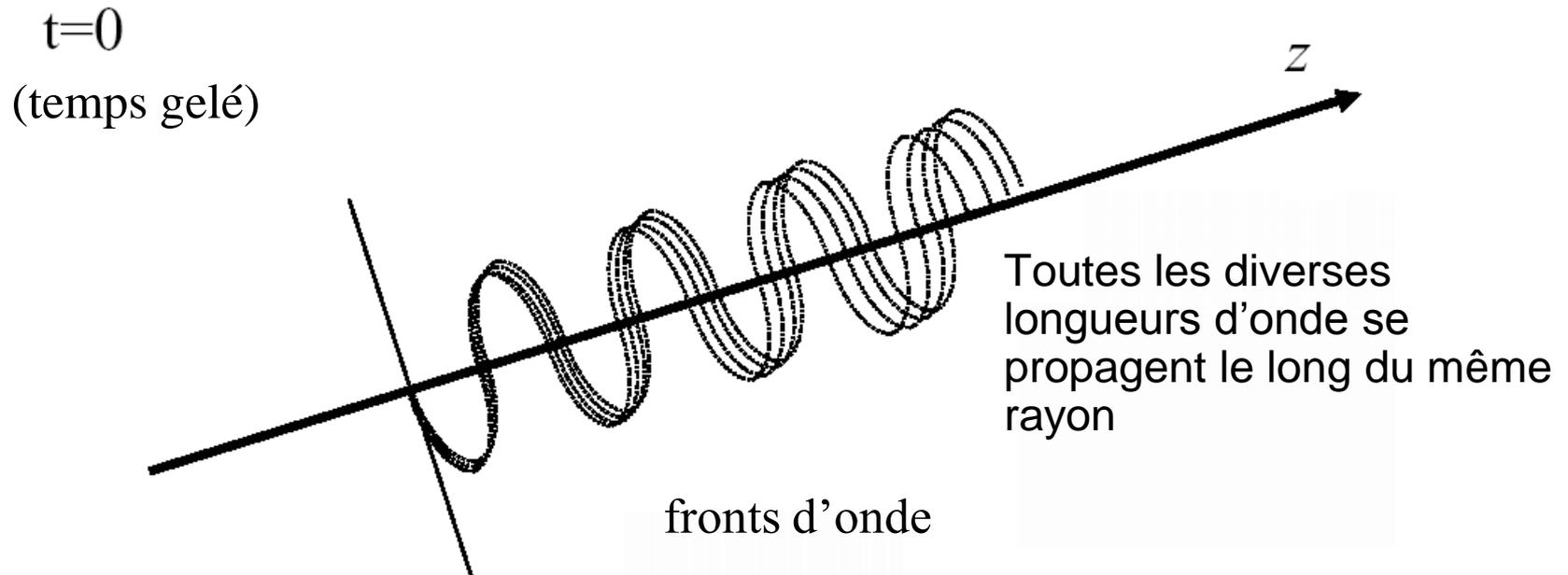
Propagation de la lumière monochromatique  
dans le vide ou dans un moyen homogène

$t = \Delta t$   
(un instant plus tard ...)



Dans un milieu homogène la lumière se  
propage selon un chemin rectiligne

# Propagation de la lumière polychromatique dans le vide ou dans un moyen homogène



Dans un milieu homogène la lumière se  
propage selon un chemin rectiligne

# Interaction avec la matière: réfraction et absorption

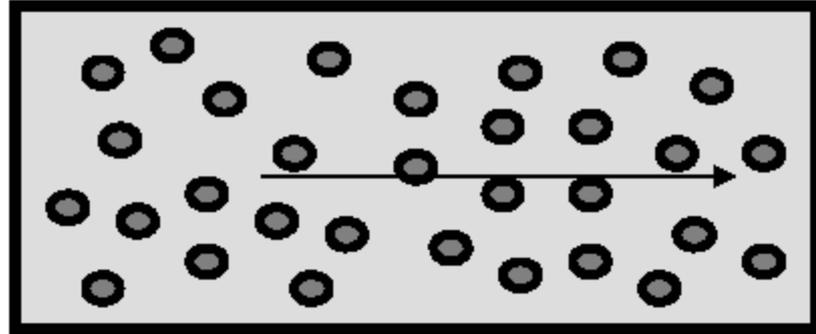


dans le vide

**Vitesse  $c = 3 \times 10^8$  m/s**

Coefficient d'absorption = 0

Exemples: air  $\approx 1$  , verre  $n \approx 1,5$  , eau = 1.33



dans la matière

**Vitesse =  $c / n$**

**$n$  = index de réfraction**

Coefficient d'absorption =  $\alpha$

$$I / I_0 = e^{-2\alpha L} \quad (\text{loi de Beer})$$

# Indice de réfraction d'un milieu transparent

L'indice de réfraction  $n$  est le rapport de la vitesse de la lumière dans le vide à celle dans ce milieu:

$$v = \frac{c}{n}$$

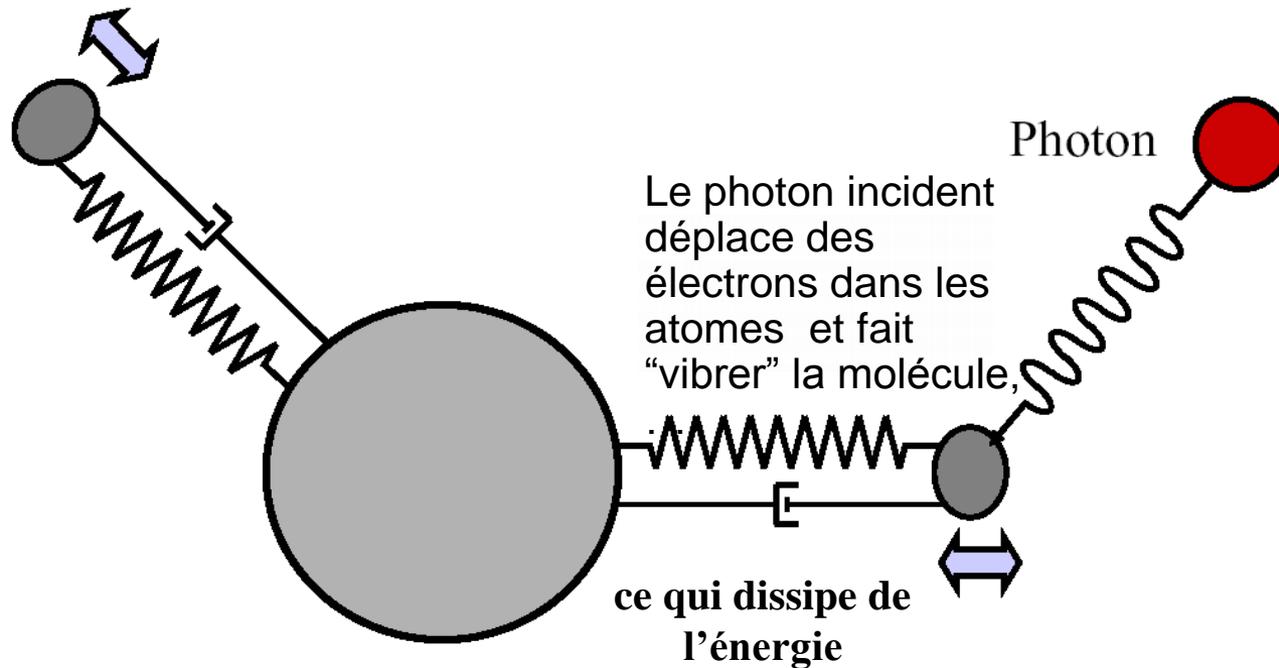
Rappelons que on a aussi pour la longueur d'onde:

$$\lambda = \frac{c}{N}$$

$N$  = fréquence de l'onde

La fréquence d'une onde électromagnétique **ne change pas** d'un milieu à un autre, ainsi c'est la longueur d'onde et donc la couleur qui peuvent changer au passage d'un milieu à un autre.

# Modèle moléculaire de l'absorption



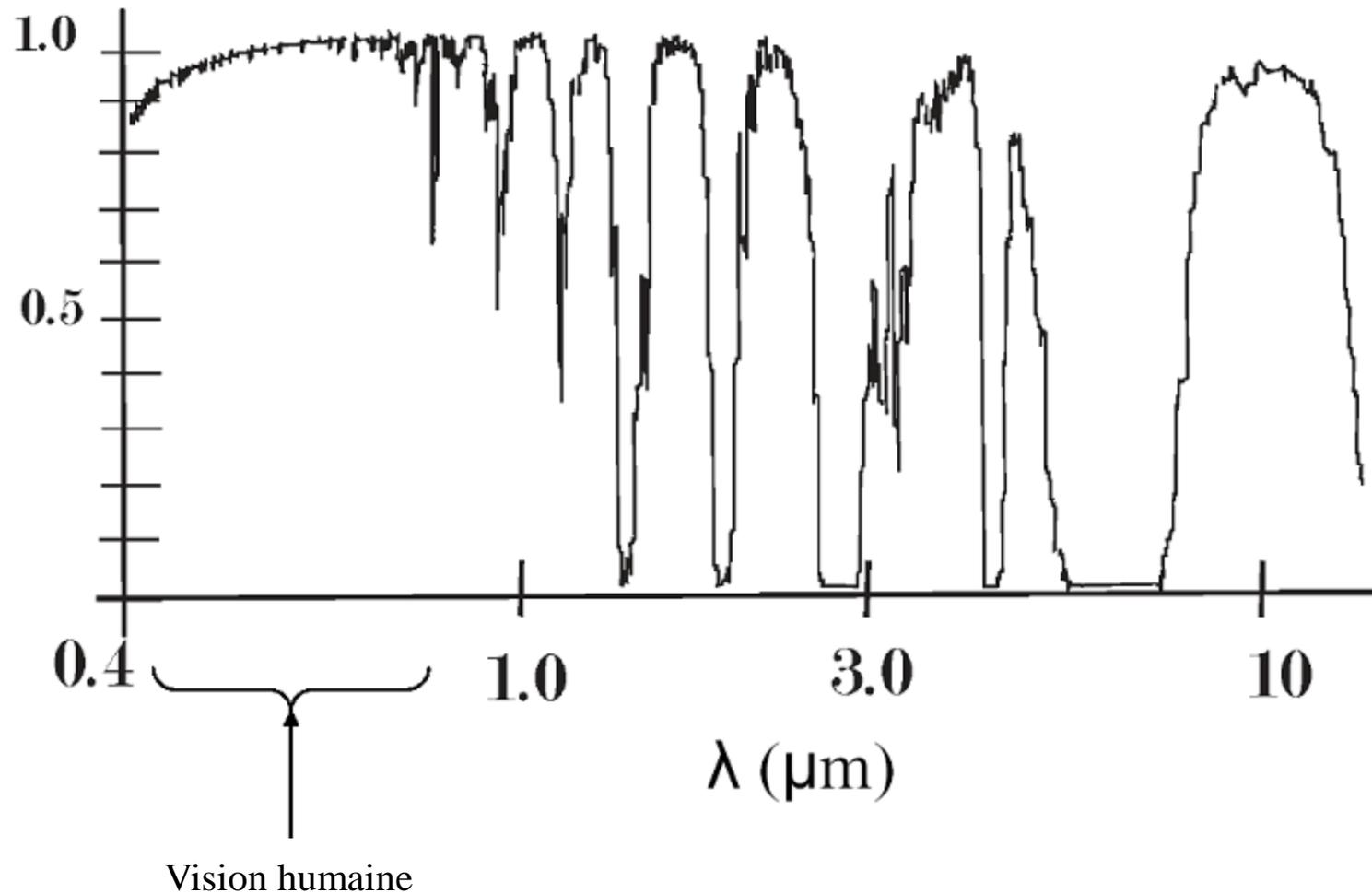
Applet : <http://www.phys.hawaii.edu/~teb/optics/java/atomphoton/index.html>

Pour approfondir:

[Interaction entre radiation \(ex. lumière\) et la matière](http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/mod3.html#c1)

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/mod3.html#c1>

# Transmission de la lumière à travers l'atmosphère



# Pourquoi le ciel est bleu ?

- [http://fr.wikipedia.org/wiki/Couleur\\_du\\_ciel](http://fr.wikipedia.org/wiki/Couleur_du_ciel)





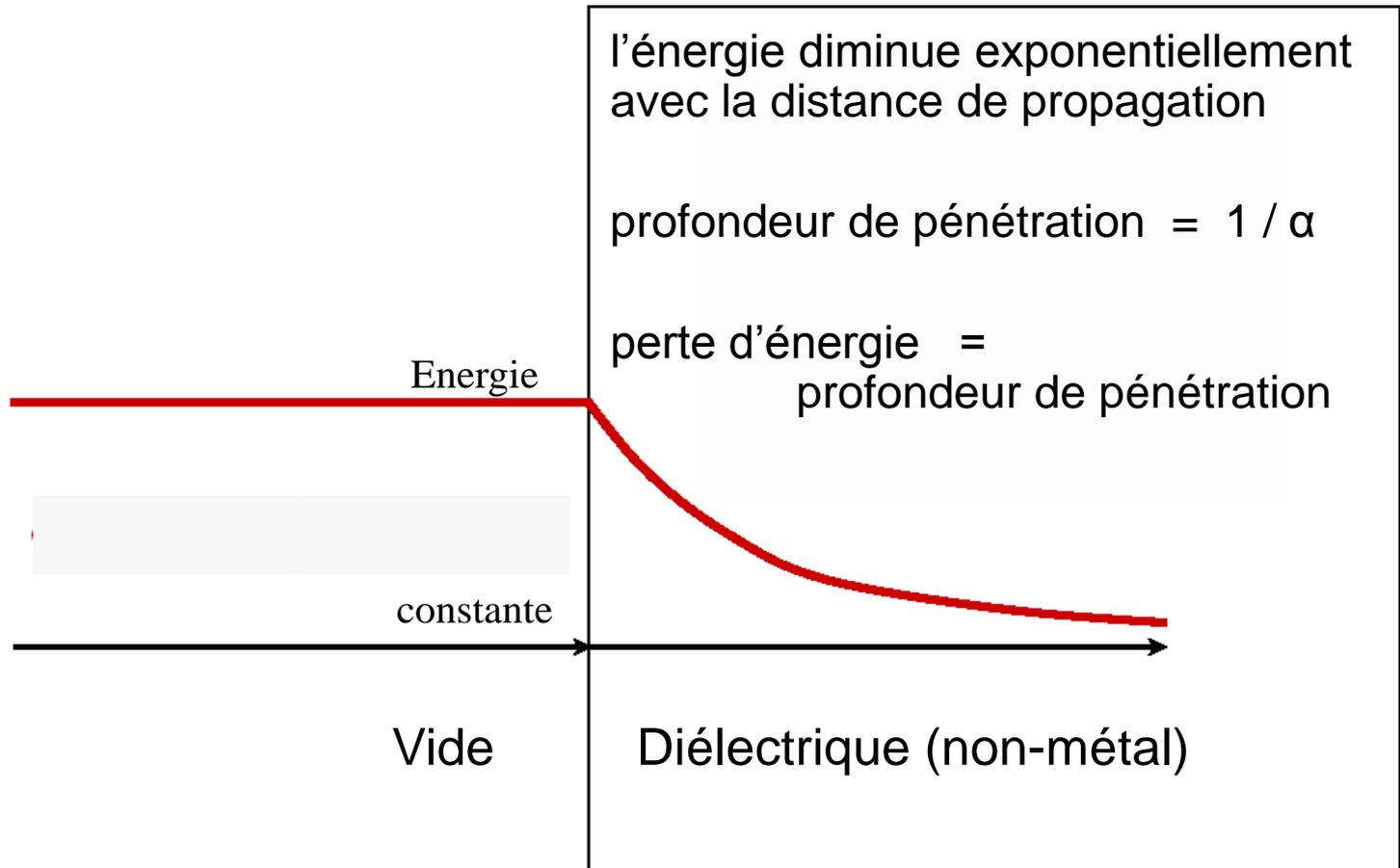
**L'interaction de la lumière avec la matière,** qui est **le sujet de l'optique**, est fondamentalement différente dans ces deux cas:

- Métaux – matériaux conducteurs

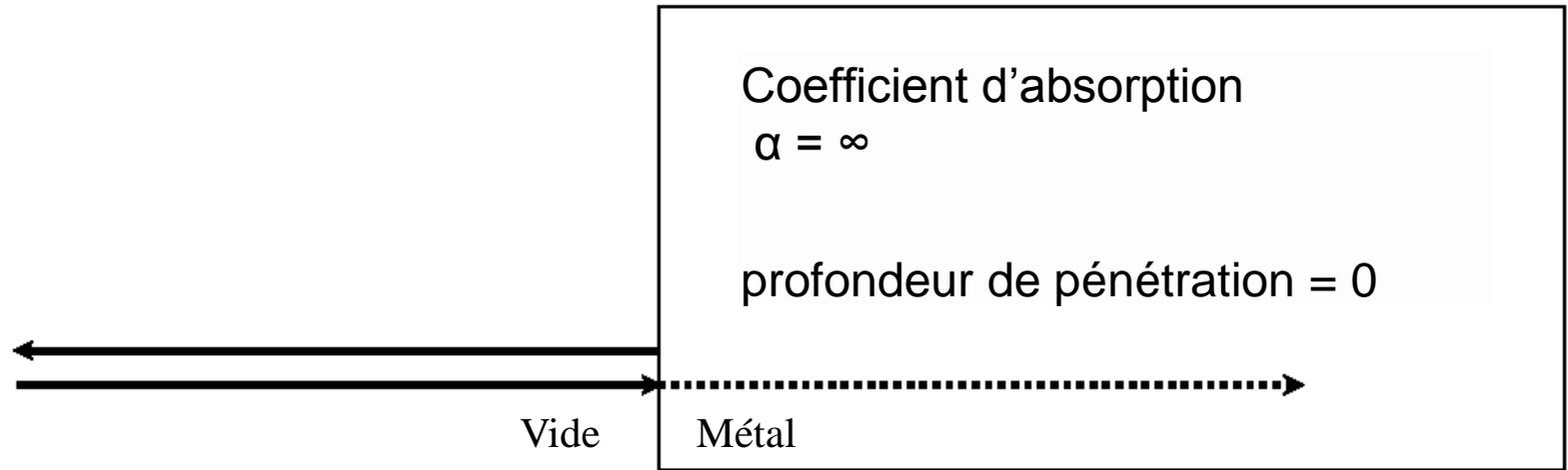
- Diélectriques – matériaux non conducteurs

# La lumière dans les diélectriques (non-métaux)

(incidence normale)

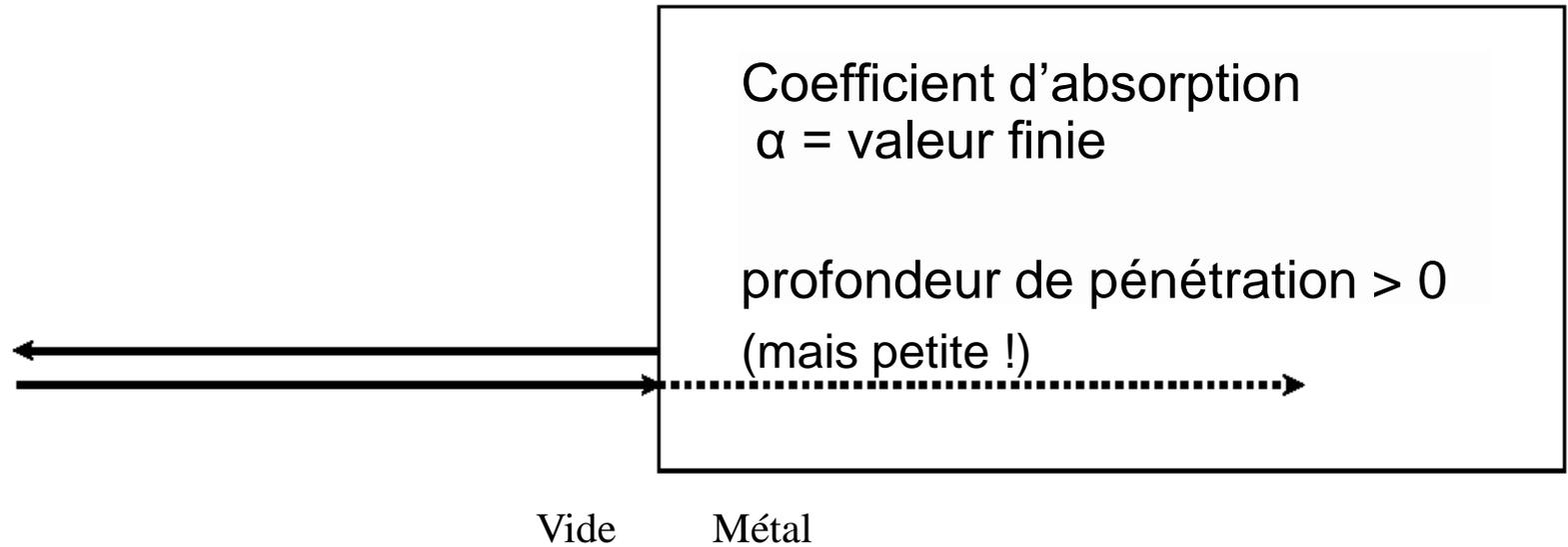


# Métal idéal = réflexion totale



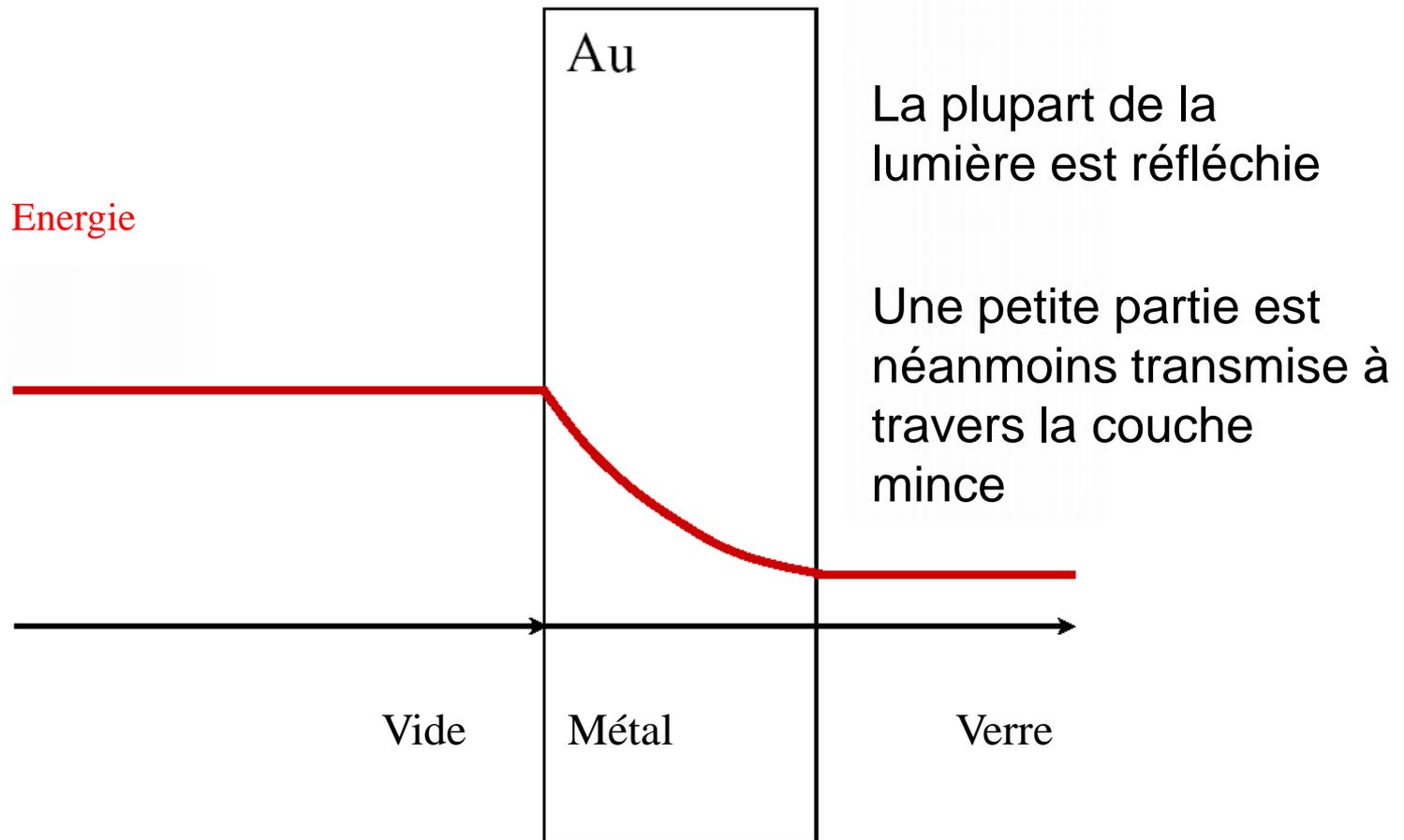
- La lumière ne pénètre pas
- Tout est réfléchi

# Métal réel



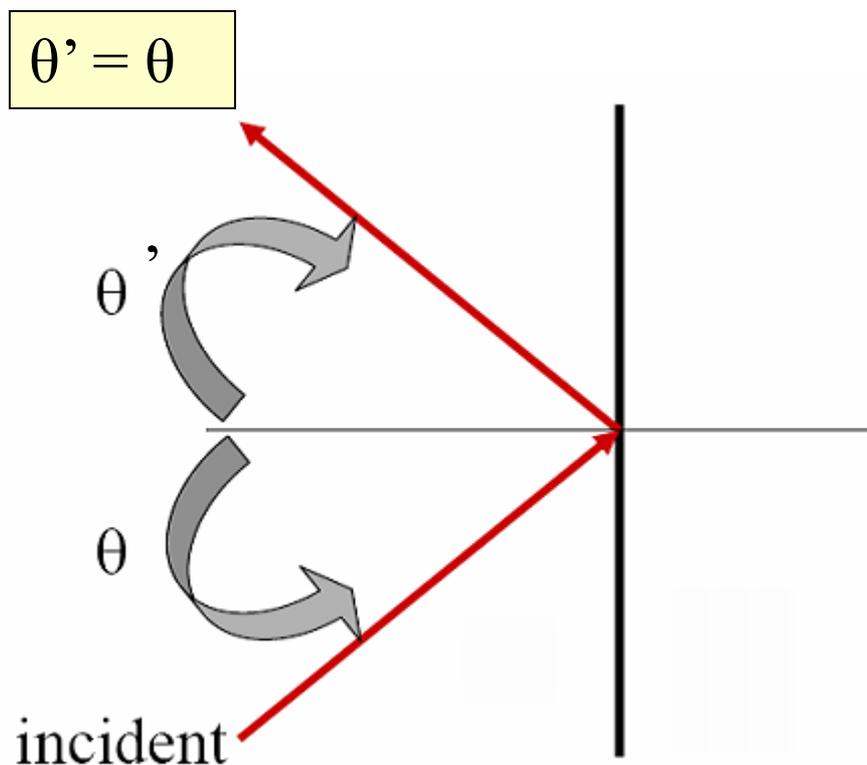
La petite fraction de lumière qui pénètre dans le métal est perdue (convertie en chaleur).

Les miroirs sont souvent fabriqués en verre avec une **couche mince métallique** (épaisseur typique: quelques dizaines de nanomètres)



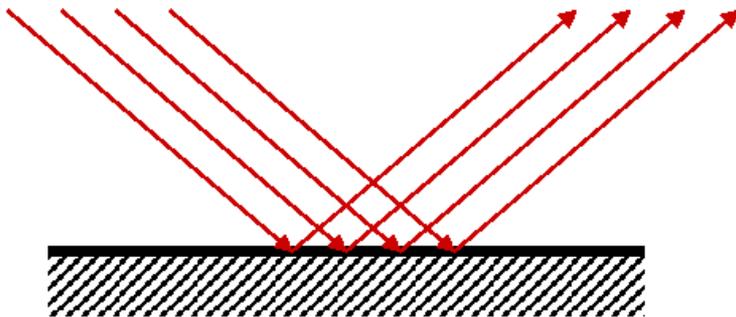
Rayon incident avec un angle avec une surface métallique (lisse)

## Loi de réflexion (miroir)



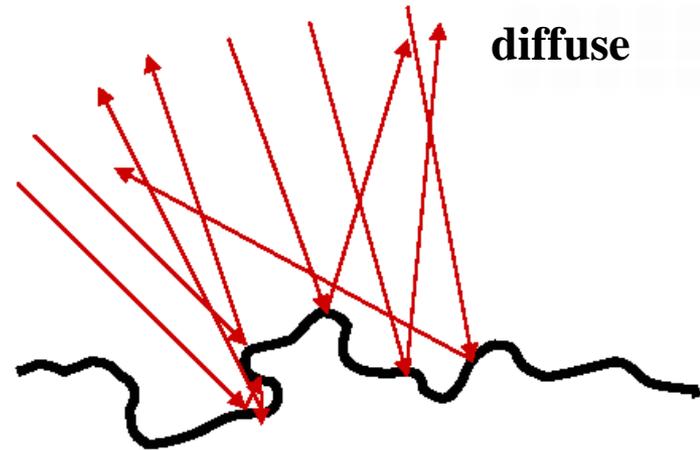
# Réflexion spéculaire et diffuse

spéculaire



Surface plate idéale  
réflexion ordonnée  
(ex. miroir bien poli)

diffuse



Surface rugueuse  
réflexion désordonnée

# Diélectriques

(par exemple le verre)

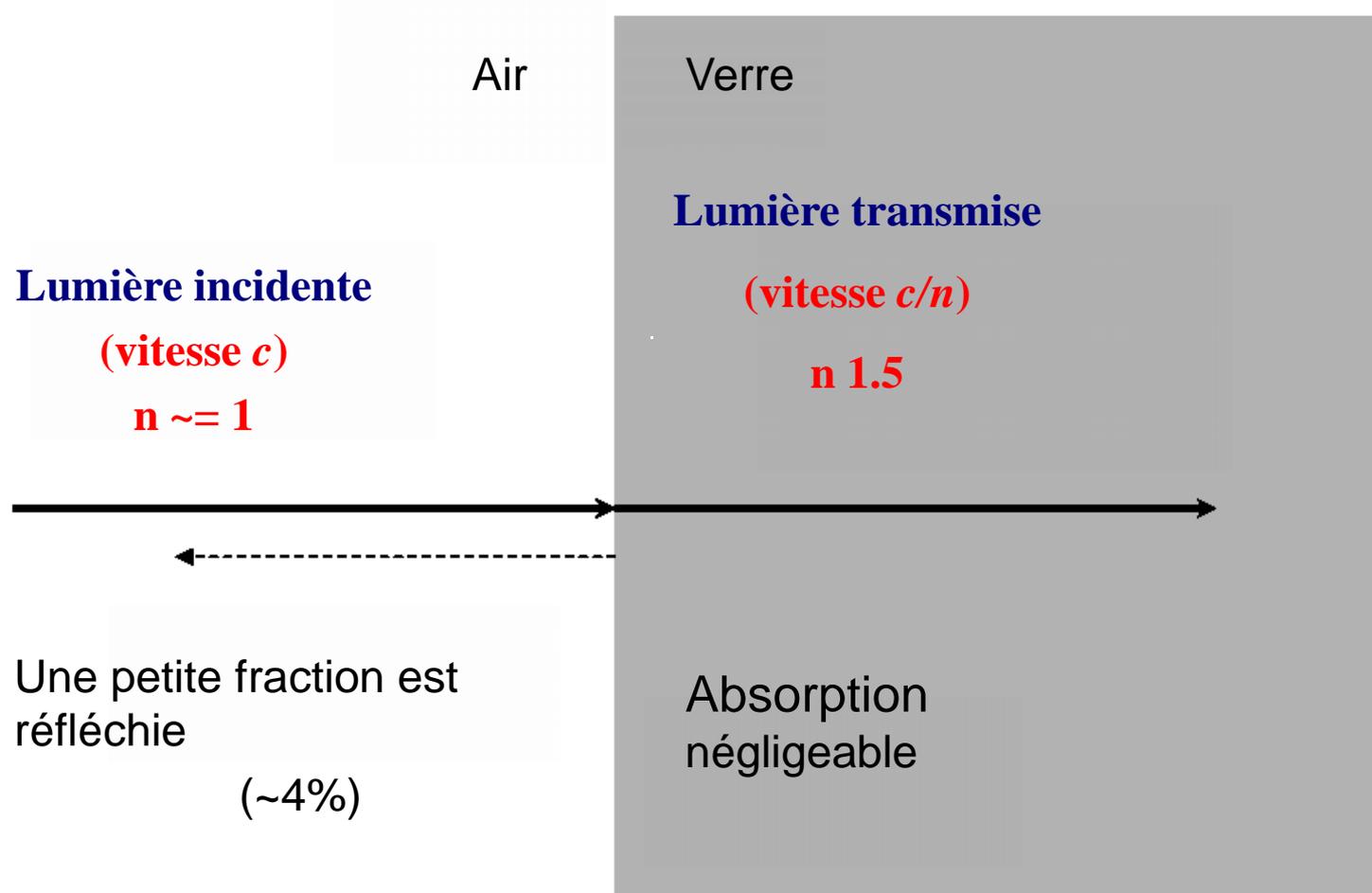
- Les matériaux traversés par la radiation électromagnétique (dont la lumière) sont appelés diélectriques.

- Wikipedia:

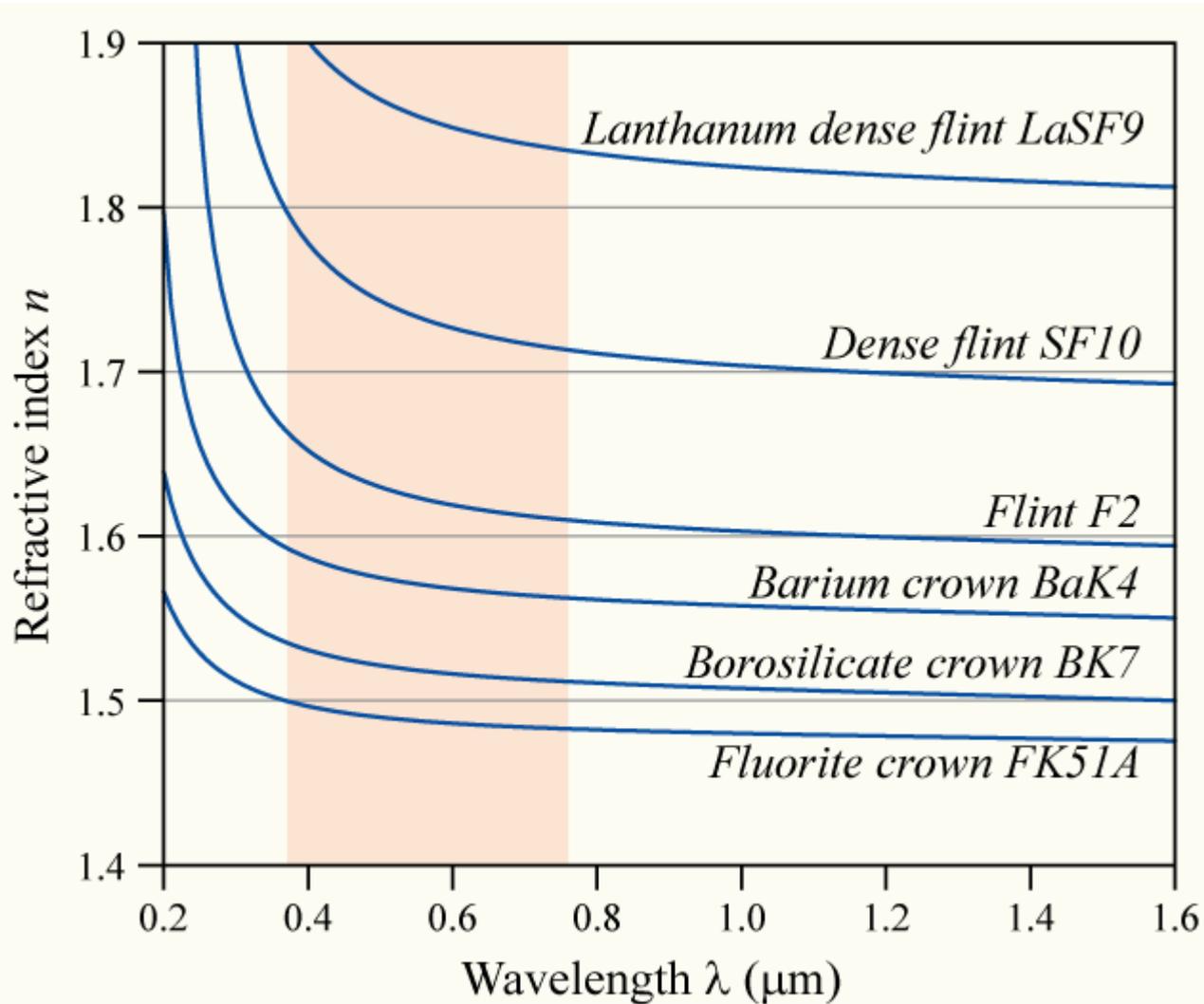
*Un matériau est diélectrique s'il ne contient pas de charges électriques susceptibles de se déplacer de façon macroscopique. Autrement dit, c'est un milieu qui ne peut pas conduire le courant électrique.*

*À ce titre, on l'appelle parfois isolant électrique.*

# Interface air/verre – incidence normale



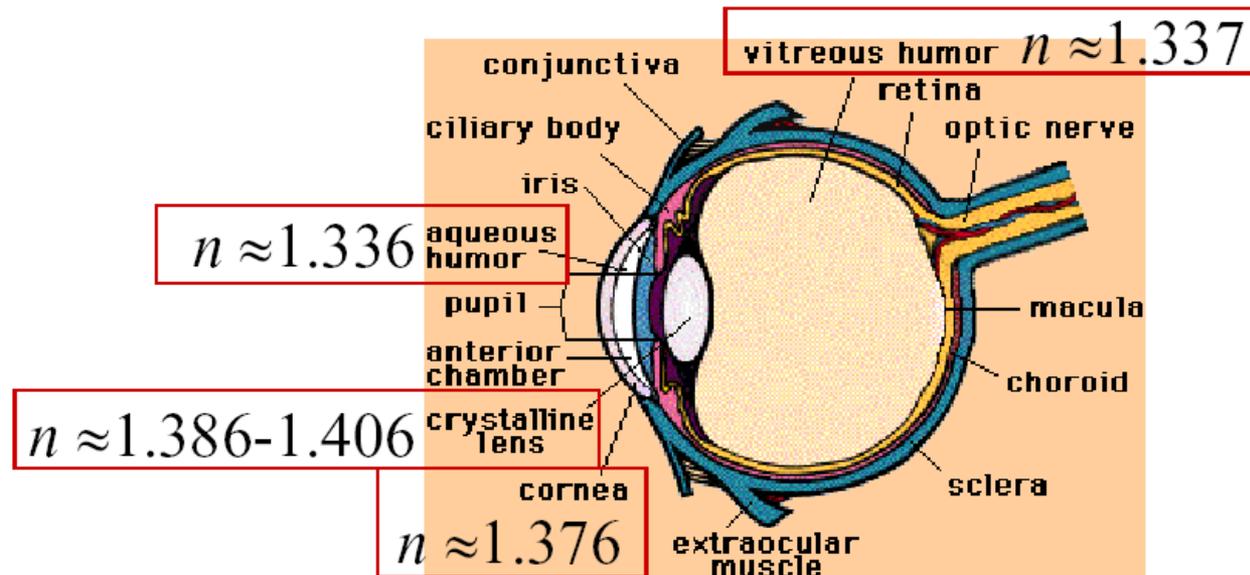
# Indice de réfraction de divers type de verre



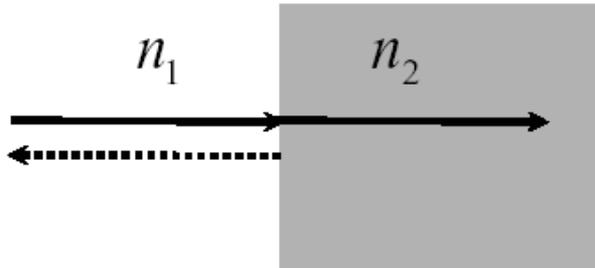
# Indice de réfraction de quelques diélectriques

- Air, légèrement  $> 1$  (mais on prend  $\approx 1$  pour les cas pratiques)
- Eau,  $n \approx 1.33$
- Verre,  $n \approx 1.45-1.75$

## L'oeil (ref. cours Perrenoud)

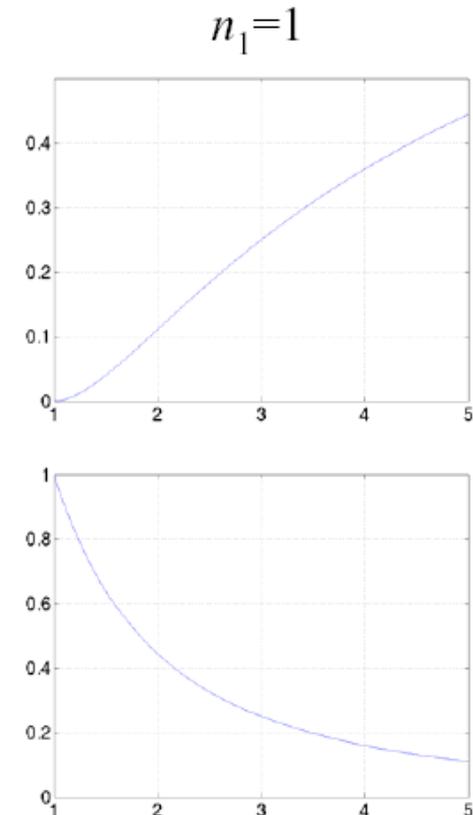


# Coefficients de transmission et réflexion entre diélectriques pour incidence normale (perpendiculaire à la surface)



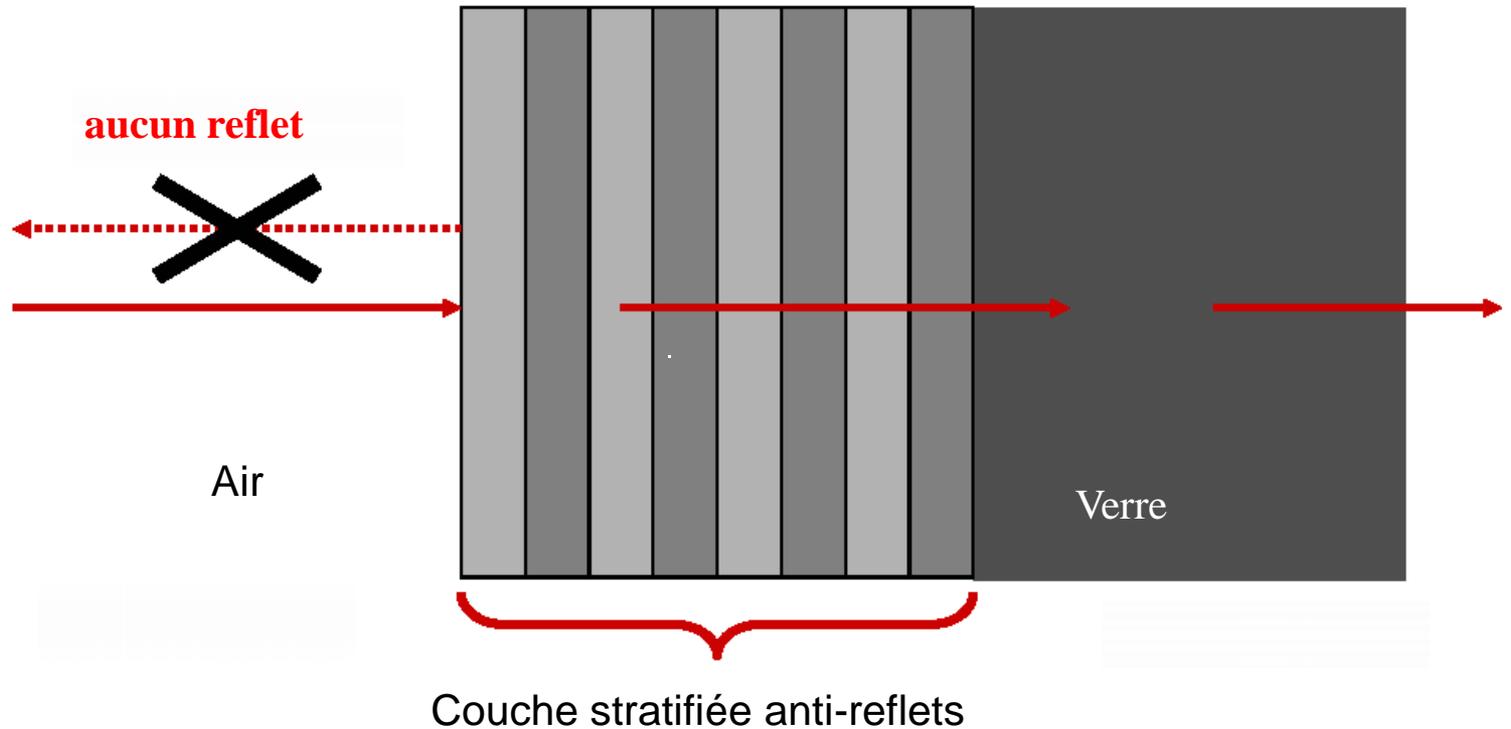
$$\left( \begin{array}{c} \text{Reflection} \\ \text{coefficient} \end{array} \right) = \frac{\text{Reflected power}}{\text{Incident power}} = \left( \frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2$$

$$\left( \begin{array}{c} \text{Transmission} \\ \text{coefficient} \end{array} \right) = \frac{\text{Transmitted power}}{\text{Incident power}} = \left( \frac{2n_1}{n_2 + n_1} \right)^2$$



**Power = puissance**

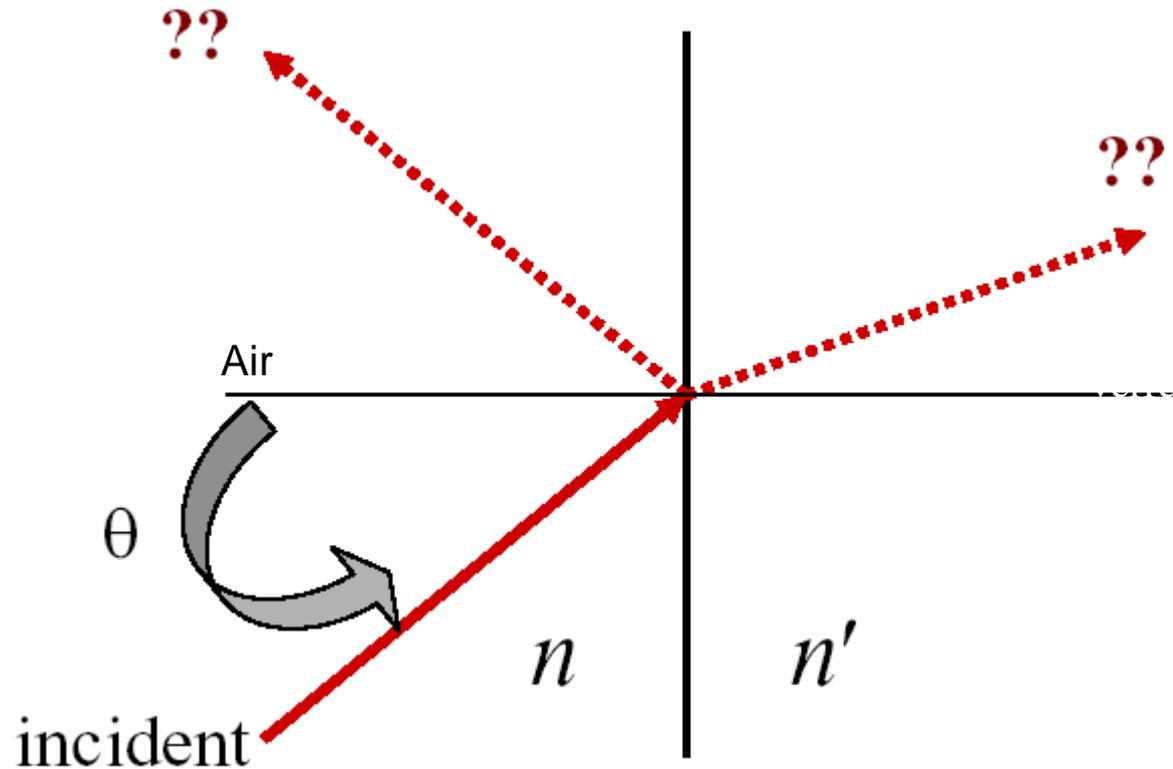
# Interface air/verre - avec traitement antireflets



Une stratification de couches minces de divers matériaux arrive à effacer la réflexion pour une large gamme d'angles d'incidence (application de l'interférence)

Jusqu'ici on a vu ce qui se passe avec une incidence normale (perpendiculaire) sur un diélectrique

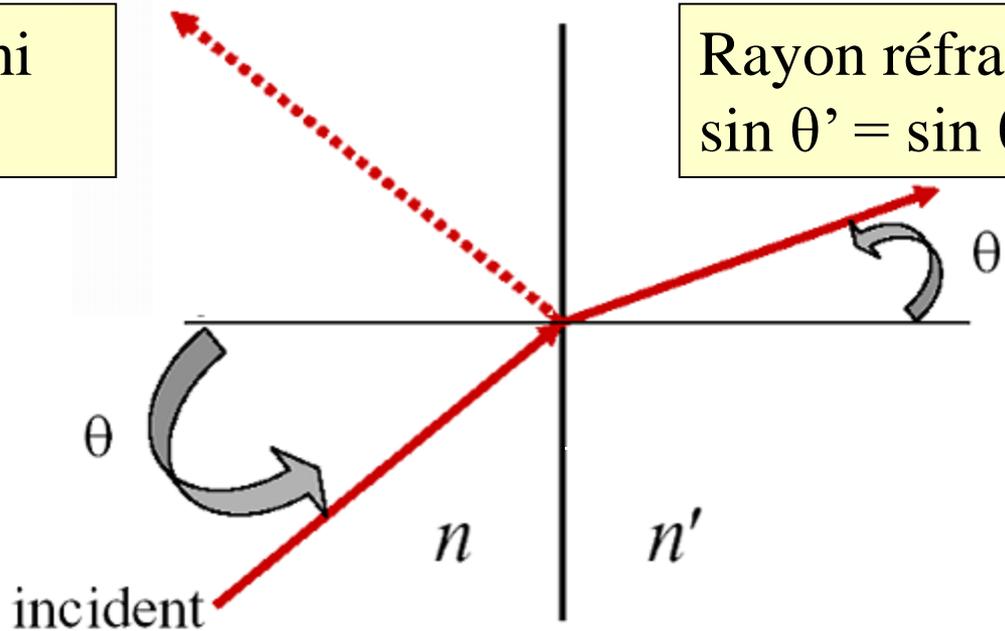
Que se passe-t-il avec un rayon incident avec un angle quelconque sur un diélectrique (ex. à l'interface air/verre) ?



# Loi de réfraction+réflexion - entre deux diélectriques

Rayon réfléchi  
 $\theta'' = \theta$

Rayon réfracté  
 $\sin \theta' = \sin \theta \cdot n / n'$

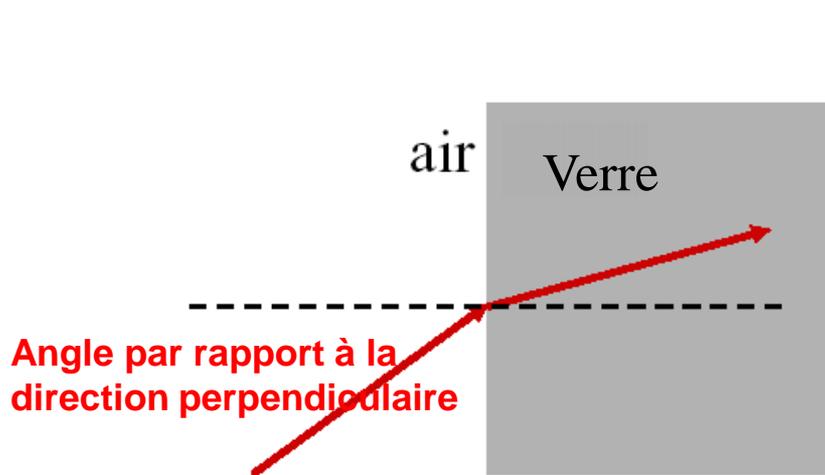


$$n \sin \theta = n' \sin \theta'$$

Loi de Snell - Descartes

# Dioptries - deux types de réfraction

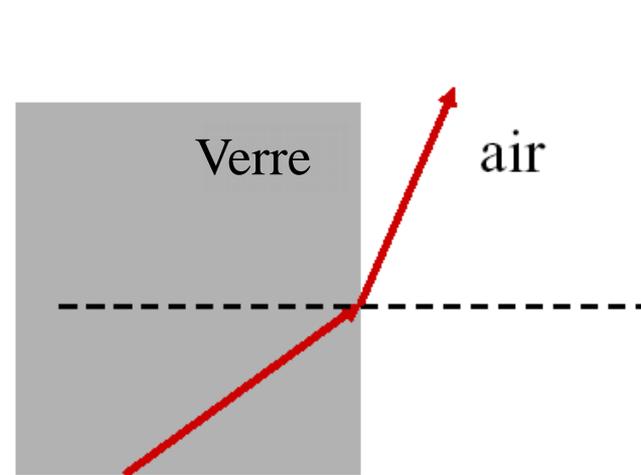
Un **dioptrie** est une surface - idéale - séparant deux milieux d'indices différents.



D'un indice **plus petit à un plus grand**, en direction d'un matériau optiquement **plus** dense

**l'angle diminue**

« je me rapproche de la normale »



D'un indice **plus grand à un plus petit**, en direction d'un matériau optiquement **moins** dense

**l'angle augmente**

« je m'éloigne de la normale »

# Quelques calculs ...

- Vérifions la loi de Snell-Descartes ...
- Posons  $n_1 = 1$  ,  $n_2 = 1.5$ , le rayon vient de (1) vers (2)  
si  $\theta_1 = 10^\circ$  calculer  $\theta_2$  ...  
quelle est la déviation du rayon réfracté ?
- Pour quel  $\theta_1$  on a la déviation maximum ?

... et si  $n_1 > n_2$  ? ...

# Quelques calculs ...

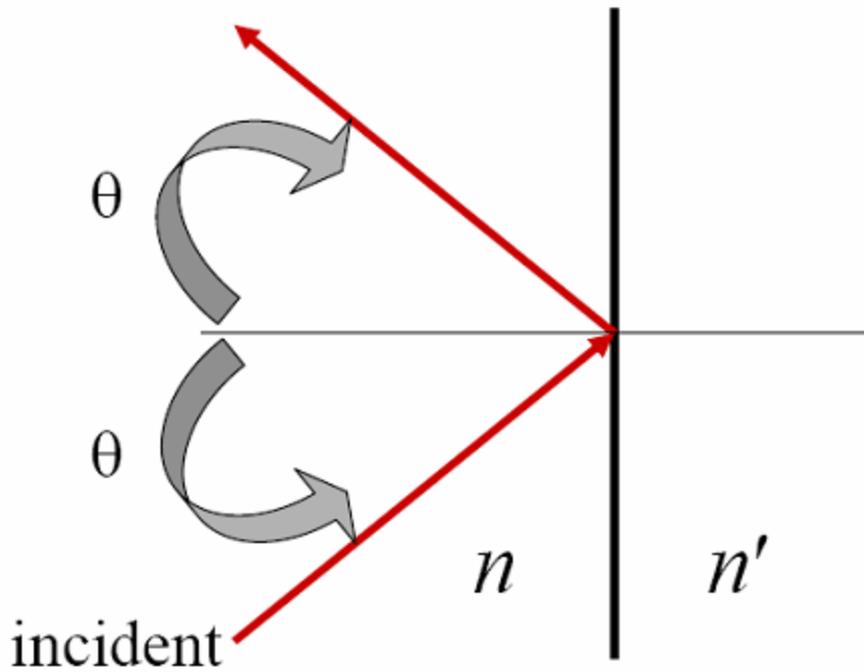
... et si  $n_1 > n_2$  ? ...

Posons  $n_1 = 1.5$  ,  $n_2 = 1.1$ ,  
le rayon vient de (1) vers (2)

- si  $\theta_1 = 40^\circ$  calculer  $\theta_2$  ...
- ... et si  $\theta_1 = 50^\circ$  ? ...

# Réflexion totale

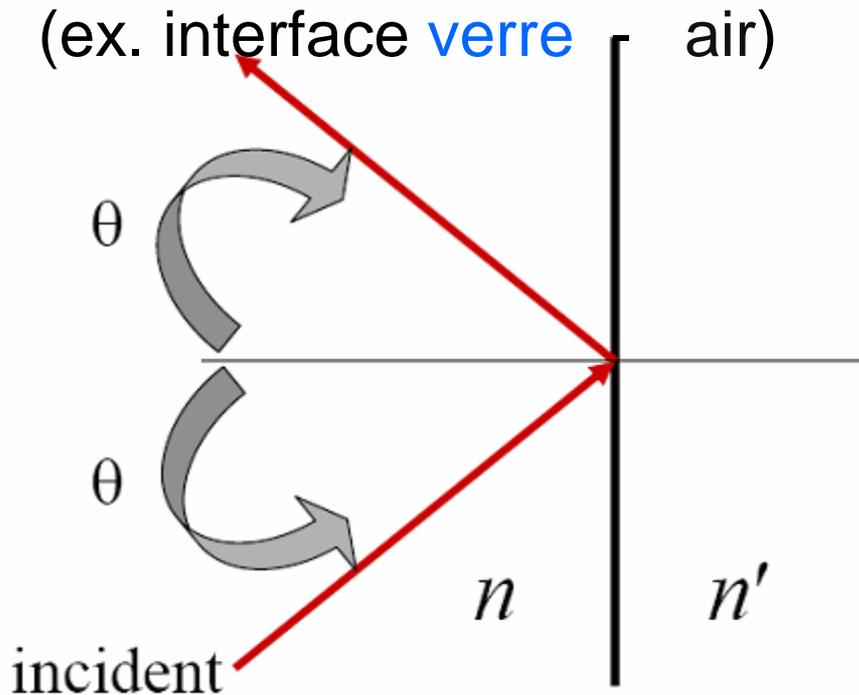
(ex. interface verre - air)



$$n \sin \theta = n' \sin \theta' \Rightarrow \sin \theta' = \frac{n}{n'} \sin \theta$$

et si  $\frac{n}{n'} \sin \theta > 1 \dots?$

# ... plus de réfraction !



$$n=1.5, n'=1$$

$$\frac{n}{n'} \sin \theta > 1 \text{ if}$$

$$\theta > \theta_{\text{crit}} = \sin^{-1} \frac{n'}{n} = 41.8^\circ$$

La **transition** arrive quand  $\theta > \theta_{\text{crit}}$

$$\theta_{\text{crit}} = \text{asin} (n' / n)$$



# Travail personnel

- Tous les chapitres 1, 2 et 3 du polycopié **et leurs exercices.**
- Exercices avec des [applets](#)

[http://iai.heig-vd.ch/~lzo/applets/Physlet\\_physics/contents/optics/refraction/ex34\\_2.html](http://iai.heig-vd.ch/~lzo/applets/Physlet_physics/contents/optics/refraction/ex34_2.html)

[http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/perso/gtulloue/optiqueGeo/dioptres/dioptre\\_plan.html](http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/perso/gtulloue/optiqueGeo/dioptres/dioptre_plan.html)

# Travail personnel

- Interaction entre radiation et matière (en anglais)  
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/mod3.html#c1>
- Wikipédia (en français):
  - Optique: <http://fr.wikipedia.org/wiki/Optique>
  - Diélectrique: <http://fr.wikipedia.org/wiki/Di%C3%A9lectrique>
  - Couleur du ciel: [http://fr.wikipedia.org/wiki/Couleur\\_du\\_ciel](http://fr.wikipedia.org/wiki/Couleur_du_ciel)
- Applets:  
Problème: évaluer l'indice de réfraction d'un matériau:  
[http://php.iai.heig-vd.ch/~lzo/applets/Physlet\\_physics/contents/optics/refraction/prob34\\_2.html](http://php.iai.heig-vd.ch/~lzo/applets/Physlet_physics/contents/optics/refraction/prob34_2.html)
  - Posez (et notez) un angle d'incidence arbitraire ...
  - Quel est l'indice de réfraction du matériau bleu ?
  - Déplacer la source de l'autre côté et répétez l'exercice, le résultat est-il le même ?



## Quelques principes et éléments optiques de base: lames, prismes, fibres

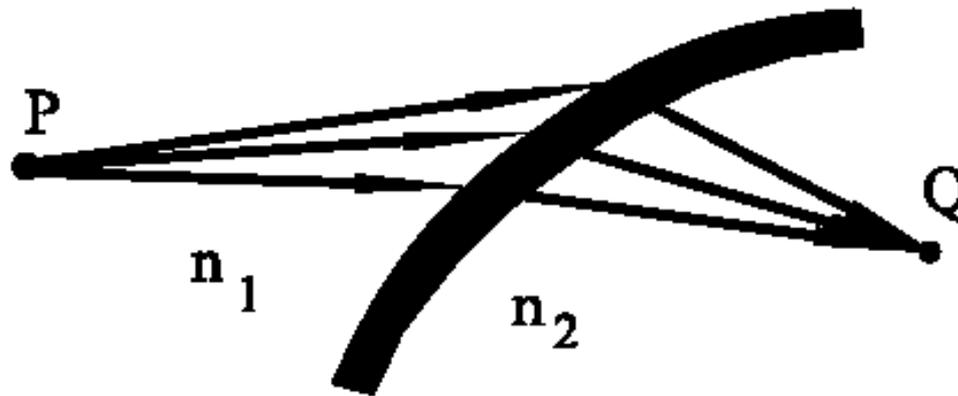
- lame à faces parallèles
- Prismes
- Dispersion chromatique
- Fibres optiques et autres guides d'onde



# Quelques principes

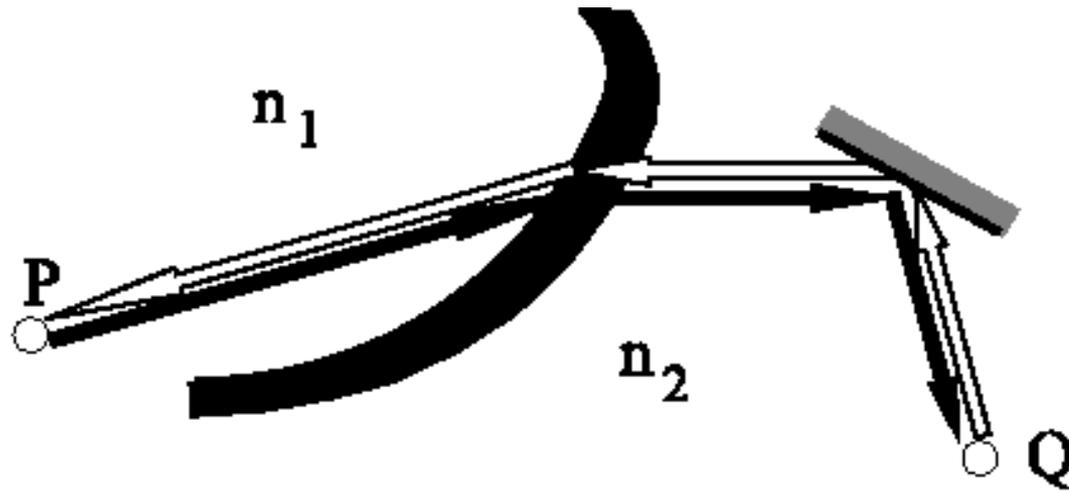
## ■ Principe de Fermat

- La lumière se propage d'un point à un autre sur des trajectoires telles que la durée du parcours soit minimale.



- Principe du retour inverse de la lumière

- Le trajet du rayon décrivant la propagation de la lumière depuis un point P vers un point Q est le même que celui qui décrit la propagation depuis le point Q vers le point P.



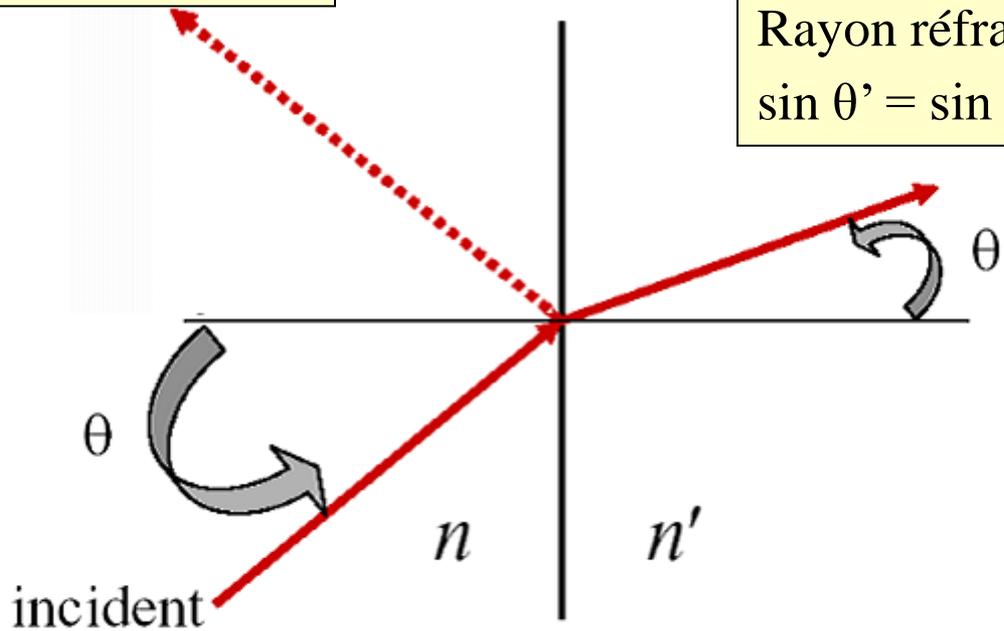
# Rappel: réfraction, réflexion

Rayon réfléchi

$$\theta'' = \theta$$

Rayon réfracté

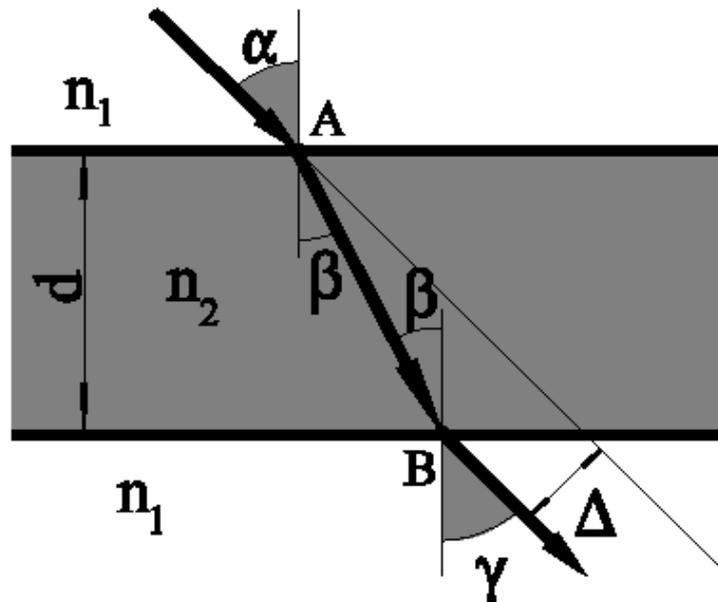
$$\sin \theta' = \sin \theta \cdot n / n'$$



# Lame à faces parallèles

[Applet: évaluer l'indice de réfraction d'une lame](http://www.iai.heig-vd.ch/~lzo/applets/Physlet%20physics/contents/optics/refraction/prob34_1.html)

[http://www.iai.heig-vd.ch/~lzo/applets/Physlet physics/contents/optics/refraction/prob34\\_1.html](http://www.iai.heig-vd.ch/~lzo/applets/Physlet%20physics/contents/optics/refraction/prob34_1.html)



$$\Delta = d \left[ \frac{\sin (\alpha - \beta)}{\cos \beta} \right]$$

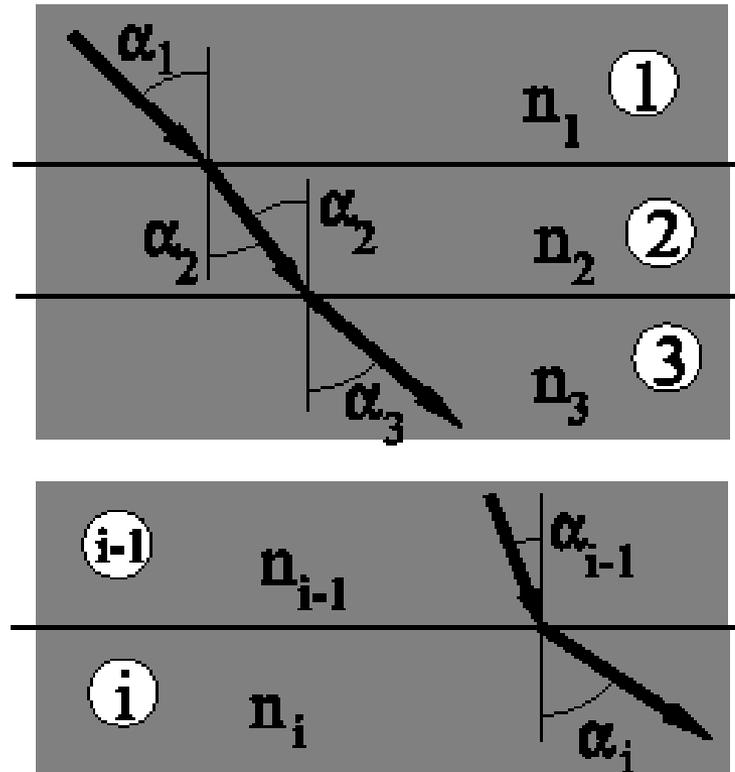
$\Delta$ : Translation du rayon [m]

$d$ : Epaisseur de la lame [m]

$\alpha$ : Angle d'incidence [-]

$\beta$ : Angle de réfraction [-]

# Plusieurs lames à faces parallèles



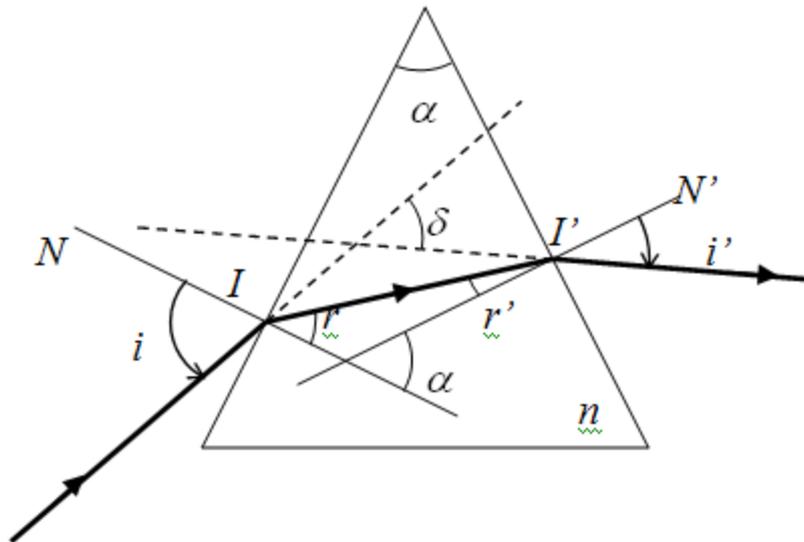
$$\frac{\sin \alpha_i}{\sin \alpha_1} = \frac{n_1}{n_i}$$

$\alpha_i$ : Angle de réfraction dans la lame  $i$  [-]  
 $n_i$ : Indice de réfraction dans la lame  $i$  [-]

# Prismes

En optique, un prisme est un milieu transparent limité par deux faces planes non parallèles.

Ces deux faces forment un dièdre: l'angle du dièdre est l'angle du prisme; l'arête du dièdre est l'arête du prisme.

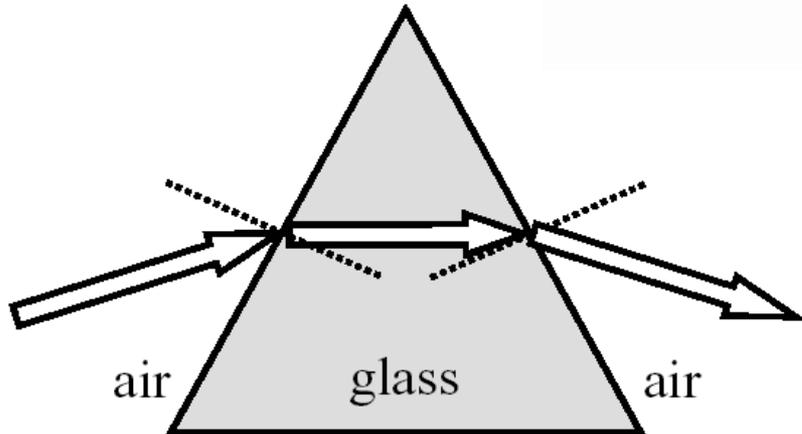


**Equations du prisme:**

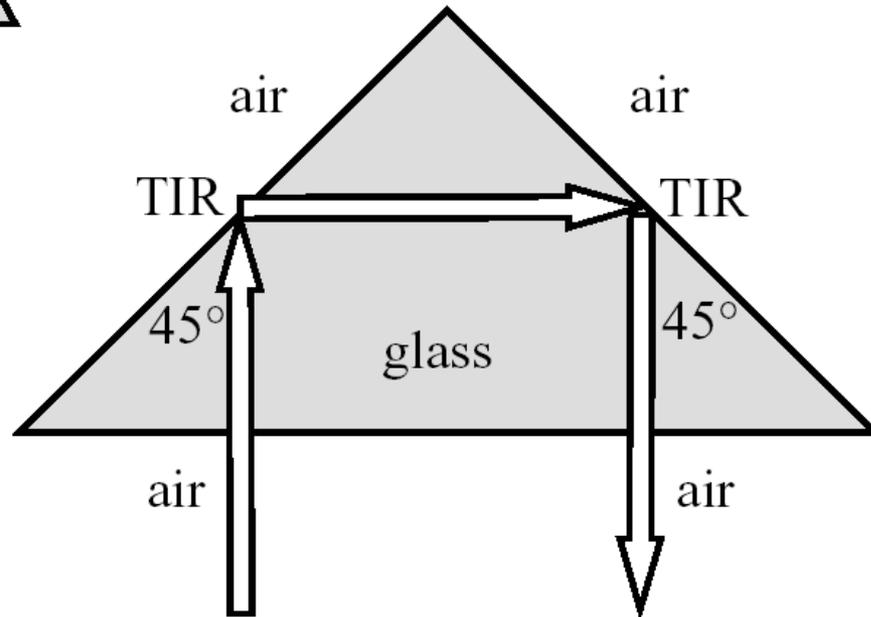
$$\begin{cases} \sin i = n \sin r \\ \sin i' = n \sin r' \\ \alpha = r + r' \\ \delta = i + i' - \alpha \end{cases}$$

$\delta$  est l'angle de déviation.

# Prismes



[Wikipedia: prisme](#)

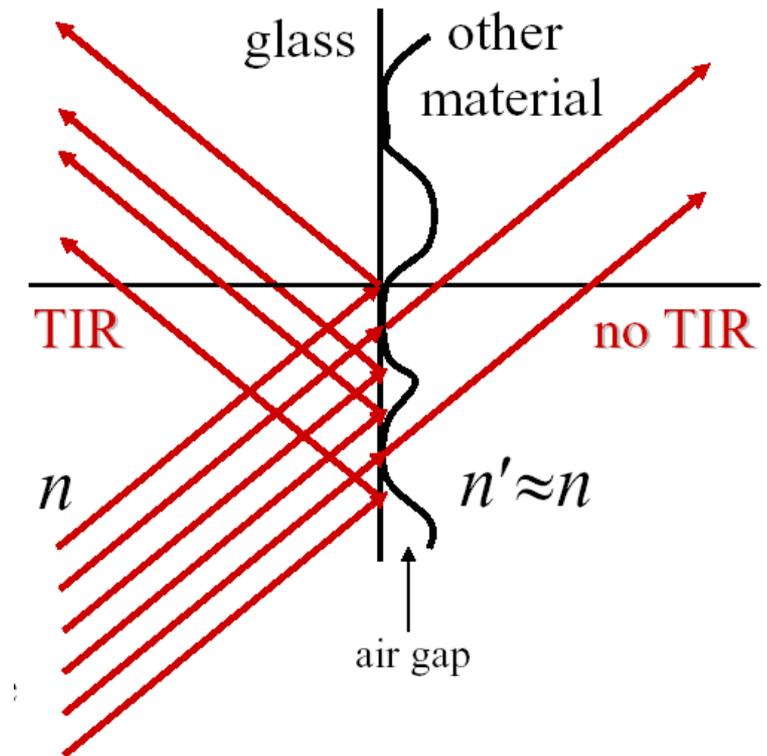


[Applet](#)

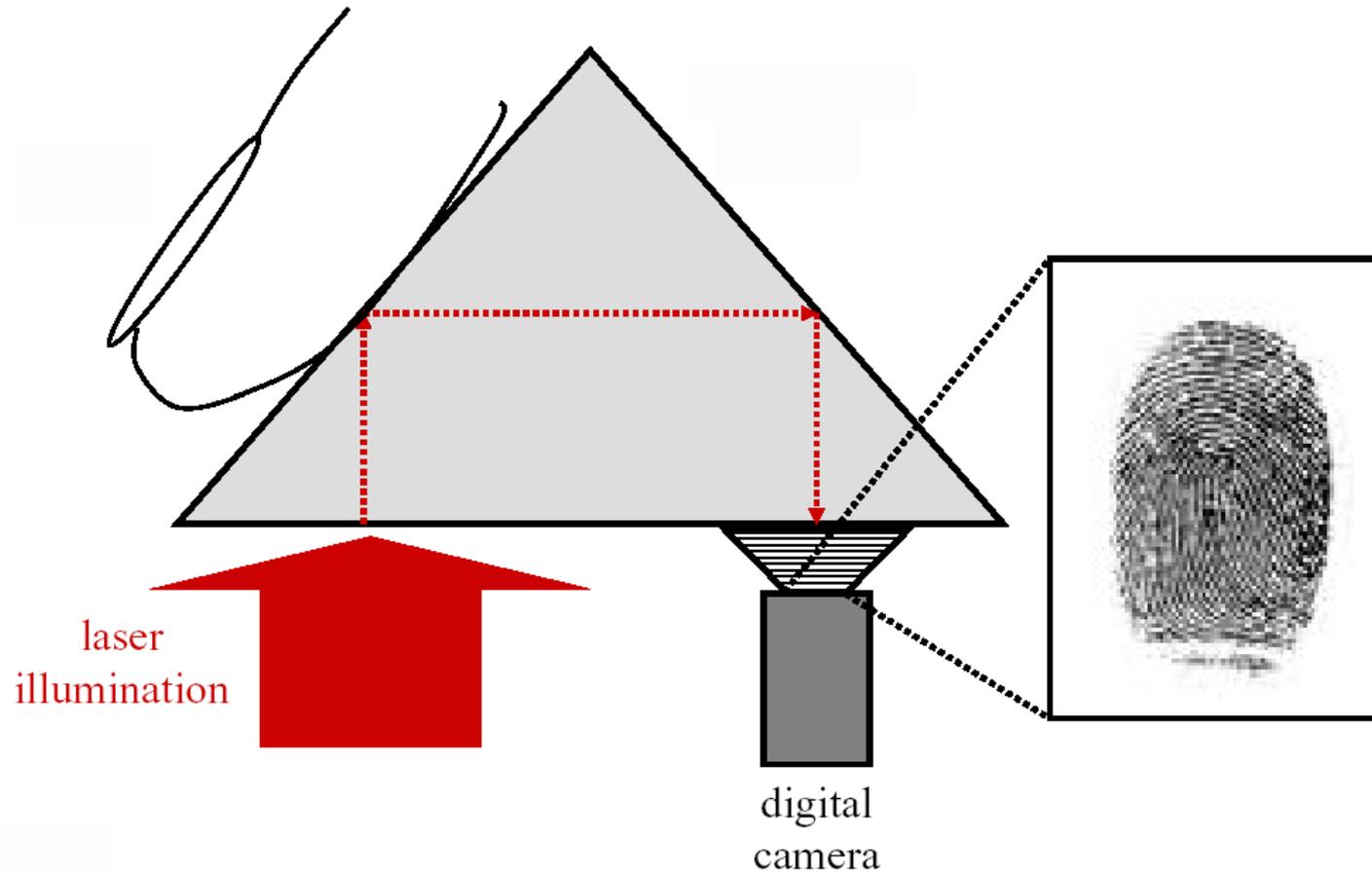
# Réflexion totale frustrée

Les rayons réfléchis manquent où un autre matière touche le verre

TIR = “*total internal reflection*”



# Application de réflexion totale frustrée: capteur d'empreintes digitales



# Le prisme permet de mettre en évidence la **dispersion chromatique** de la lumière blanche

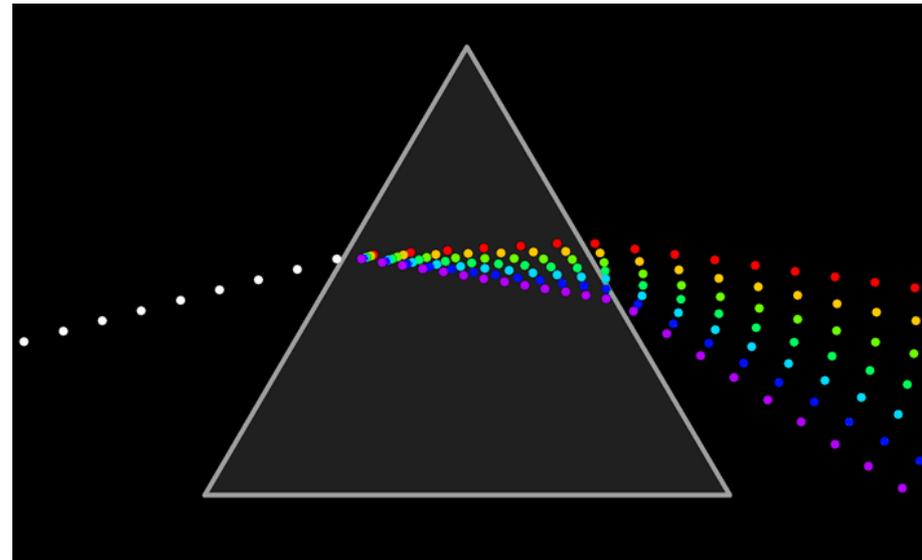
L'indice de réfraction d'un verre (et des autres matériaux) varie en fonction de la longueur d'onde, ce qui provoque une dispersion chromatique.

Coefficient de dispersion ou **nombre d'Abbe** :

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

$n_D$  = indice à 588 nm (raie de l'hydrogène)

F et C désignent deux raies de l'hydrogène (longueurs d'onde  $\lambda_F = 486,1$  nm et  $\lambda_C = 656,3$  nm)



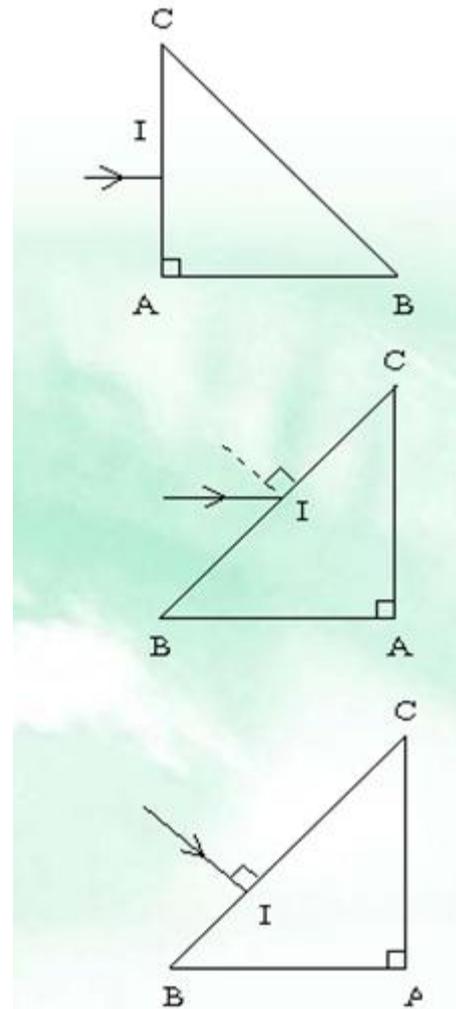
[Applet](http://php.iai.heig-vd.ch/~lzo/applets/applets_optique/www.univ-lemans.fr/enseignements/physique/02/optigeo/prisme.html)

[http://php.iai.heig-vd.ch/~lzo/applets/applets\\_optique/www.univ-lemans.fr/enseignements/physique/02/optigeo/prisme.html](http://php.iai.heig-vd.ch/~lzo/applets/applets_optique/www.univ-lemans.fr/enseignements/physique/02/optigeo/prisme.html)

# Travail personnel

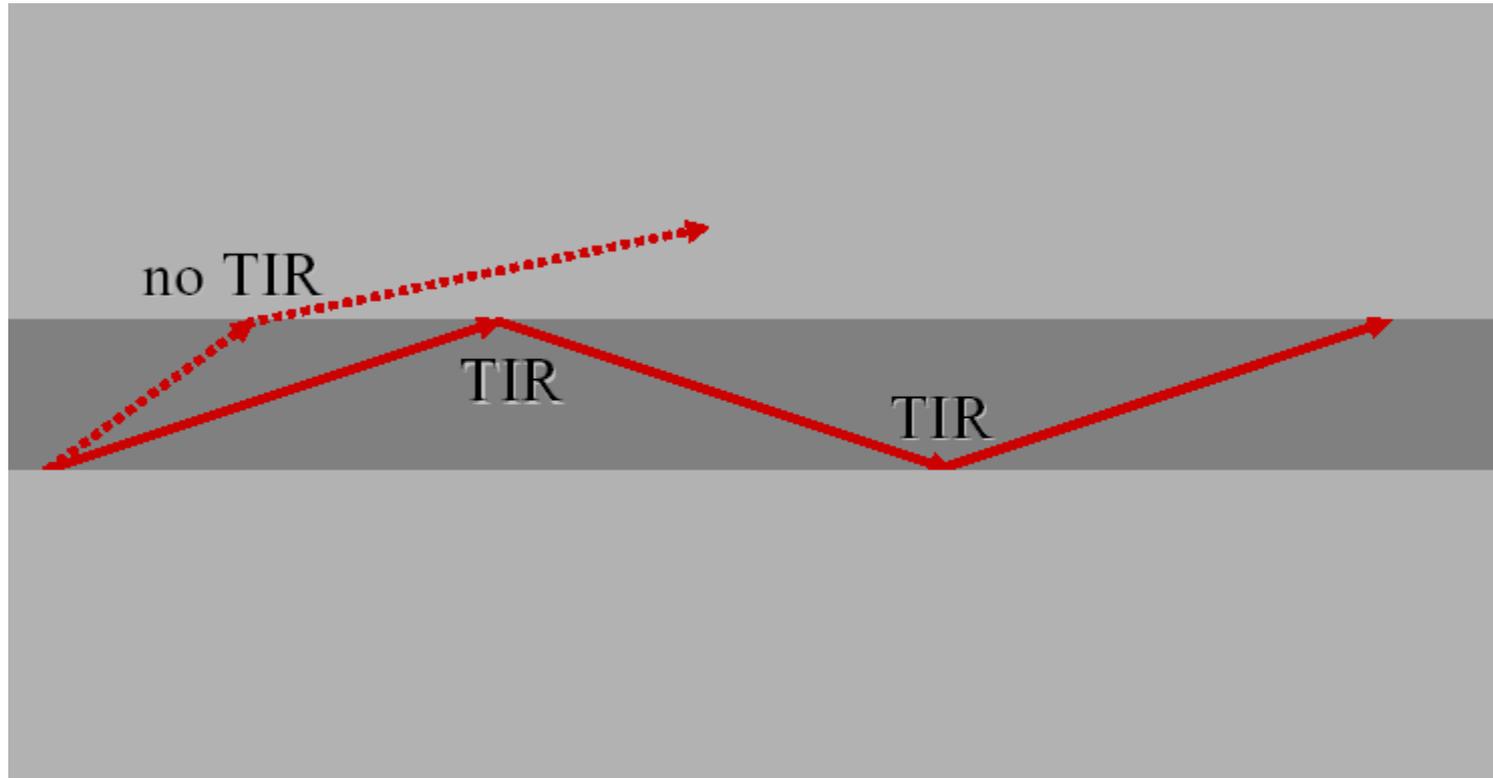
On considère un prisme rectangle isocèle  $ABC$ , rectangle en  $A$ , d'indice  $n=1,5$ .

Tracer la marche du rayon incident à travers le prisme et calculer la déviation du rayon incident à la traversée du prisme dans chacun des cas suivants (on indiquera le ou les cas où il y a réflexion totale).





# Application de réflexion totale Guides d'ondes optiques



Guide d'onde planaire: matériaux diélectrique à grand indice pris en sandwich entre deux couches à indice plus petit



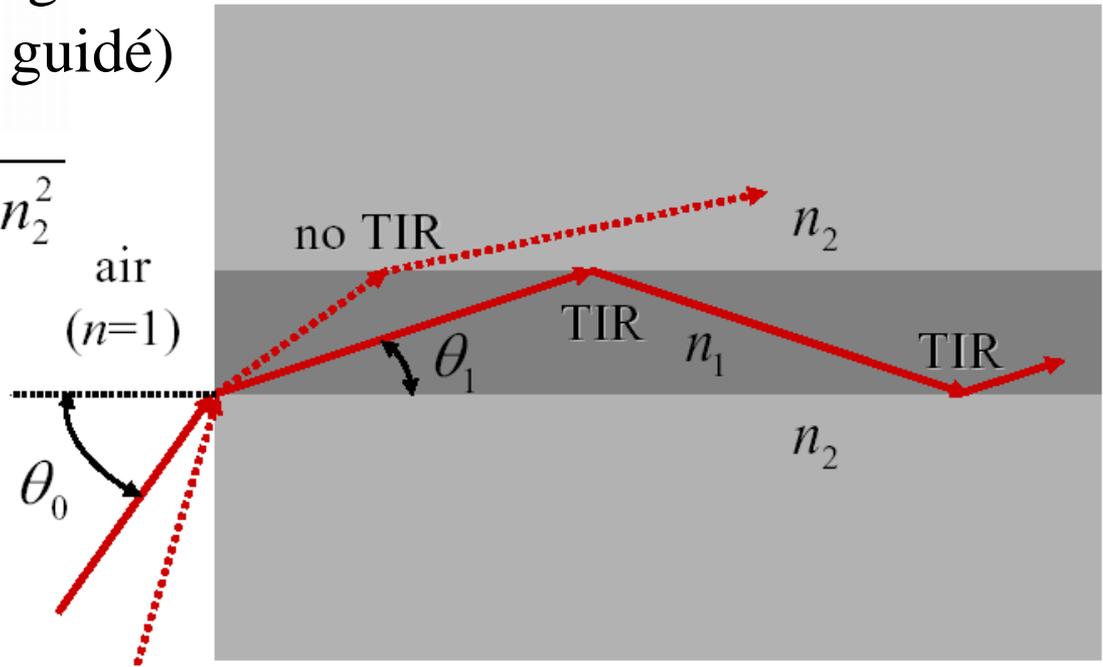
# Applet

<http://www.proftnj.com/opt-fibre.htm>

# Guides d'ondes optiques: O.N. = ouverture numérique

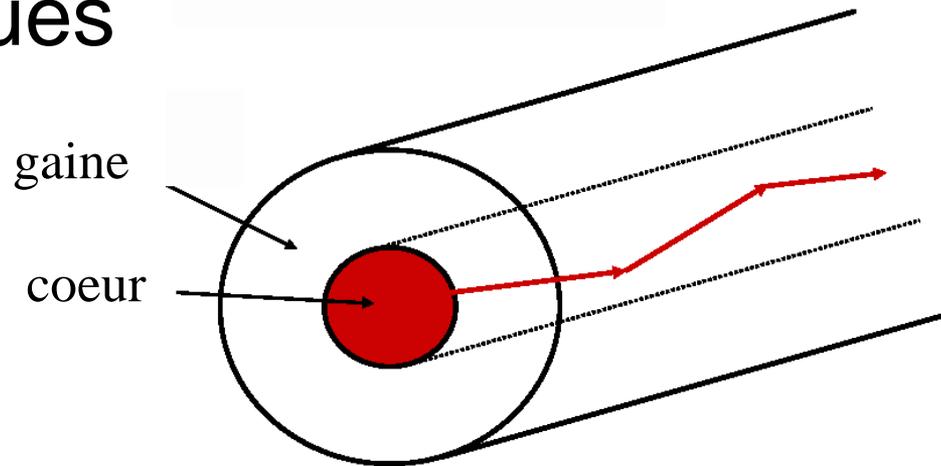
O.N. =  $\sin$  (angle le plus grand  
qui est guidé)

$$\text{O.N.} = \sin \theta_0 \leq \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

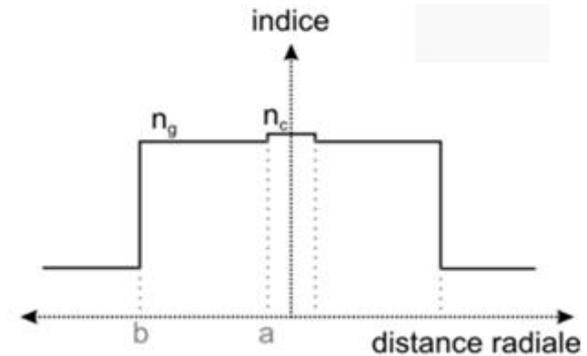
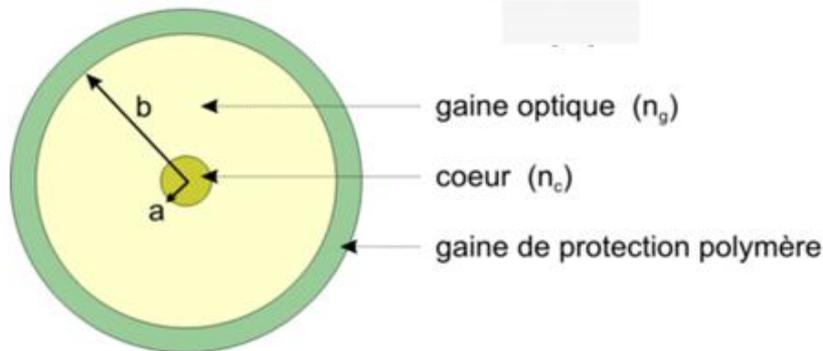


plus  $n_1/n_2$  est grand, plus est élevée la O.N.

# Fibres optiques

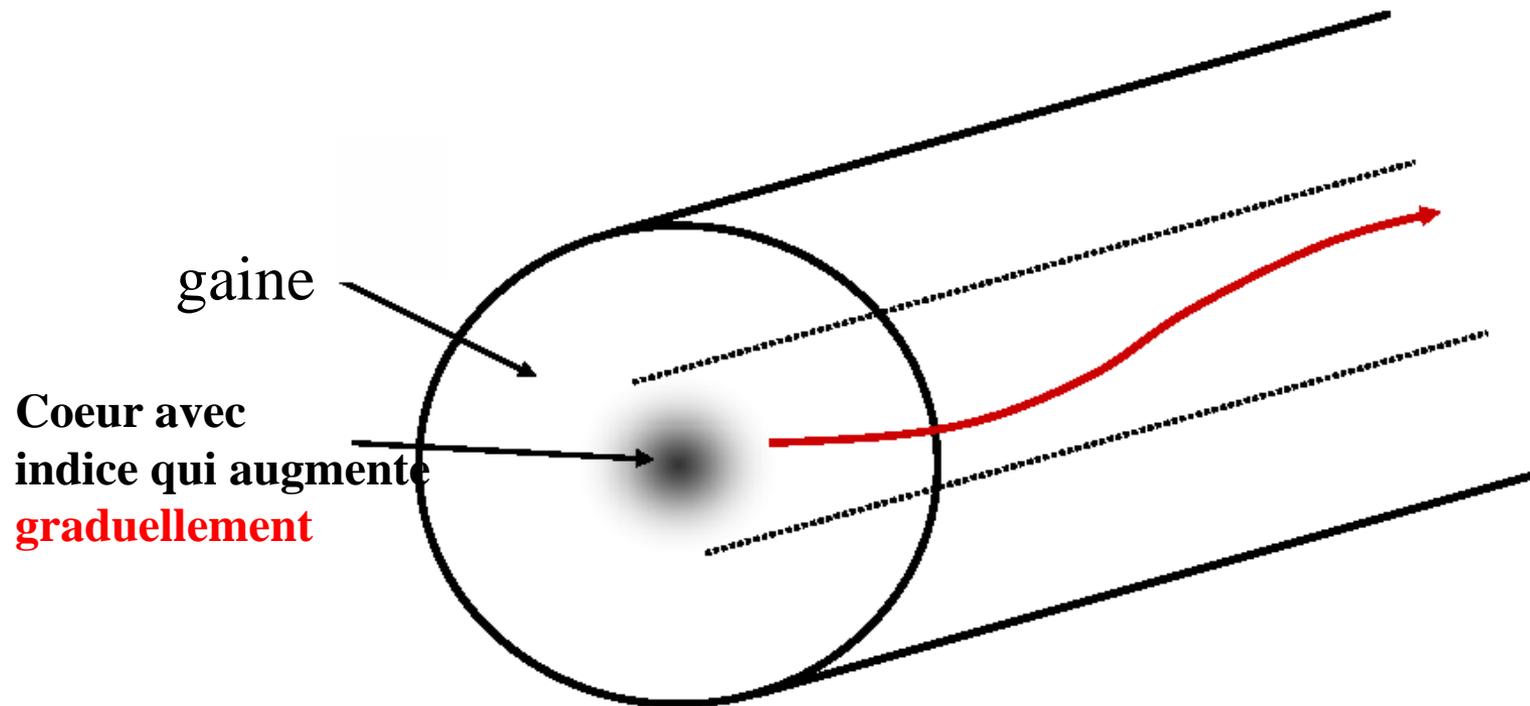


- diamètre du cœur = 8-10  $\mu\text{m}$  (fibres monomode pour IR et visible)
- diamètre de la gaine = 250  $\mu\text{m}$



- contraste des indices  $\Delta n = 0.007$   
(O.N. très bas ... on calcule ? ...)
- atténuation = 0.25 dB/km

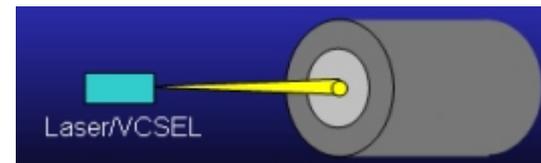
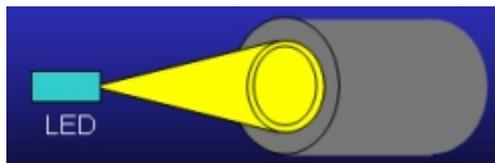
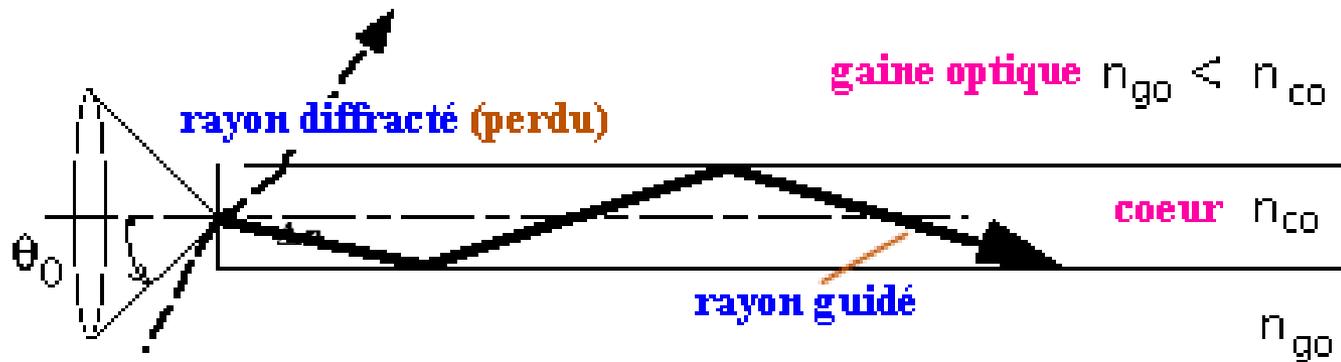
# Fibres optiques à gradient d'indice



Les rayons vrillent autour de l'axe de la fibre

Les yeux des insectes sont basés sur ce principe !

Pour exploiter une fibre optique il faut donc faire **converger la lumière** à l'entrée à l'intérieur du cône avec une image qui soit inférieure au diamètre du cœur ce qui est relativement aisé à obtenir avec une source laser mais bien plus difficile avec une source classique.



# Atténuation dans les fibres optiques

Les causes des pertes dans les fibres sont multiples.

Il y a, entre autres:

- l'absorption par les impuretés,
- la diffusion par les impuretés ou par les défauts d'interface cœur-gaine et la diffusion de Rayleigh qui est la diffusion de la lumière sur les molécules du matériau (verre ou silice),
- les courbures et les micro-courbures de la fibre,
- la diffusion et la réflexion aux épissures (jonctions).

Ces effets combinés contribuent à détériorer la transmission de la fibre.

L'atténuation minimum d'une fibre unimodale standard des télécommunications se situe à 1550 nm; elle est de l'ordre de **0,2 dB/km**.

# Les fibres optiques ont des applications dans tous les domaines:

- telecom
- instrumentation
- illumination
- ... etc., etc.

ex. chez le dentiste: fibre UV pour polymériser sur place  
les plombages en résine

# Travail personnel

- Wikipédia (en français):
  - Prisme
  - Fibre optique
  - Dispersion
- Tout le chapitre 4 du polycopié, avec exercices
- Explorez et exercez-vous avec les applets