

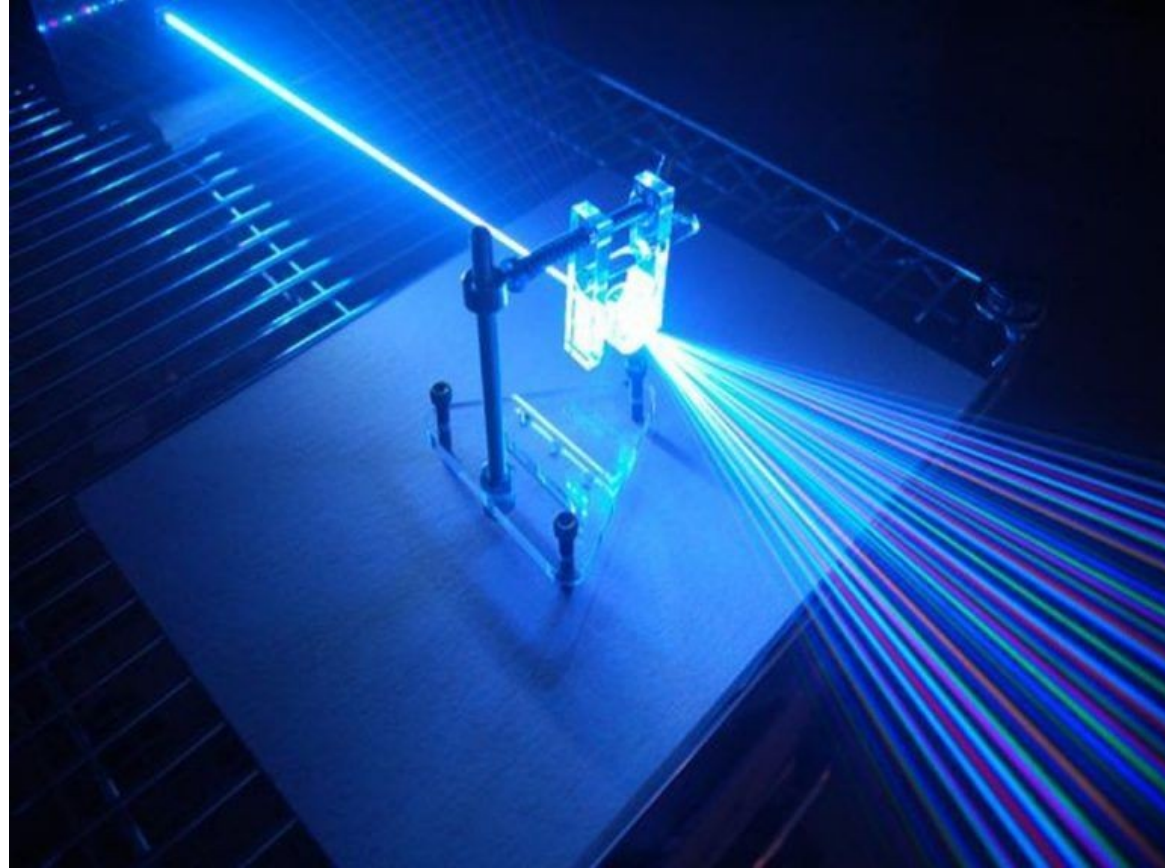
Matière, rayonnement et transformations 4

Action de la matière sur la lumière : diffusion, réfraction, réflexion

Notions utilisées :

1. Introduction
- 2-3. Structure de la matière
4. Les ondes

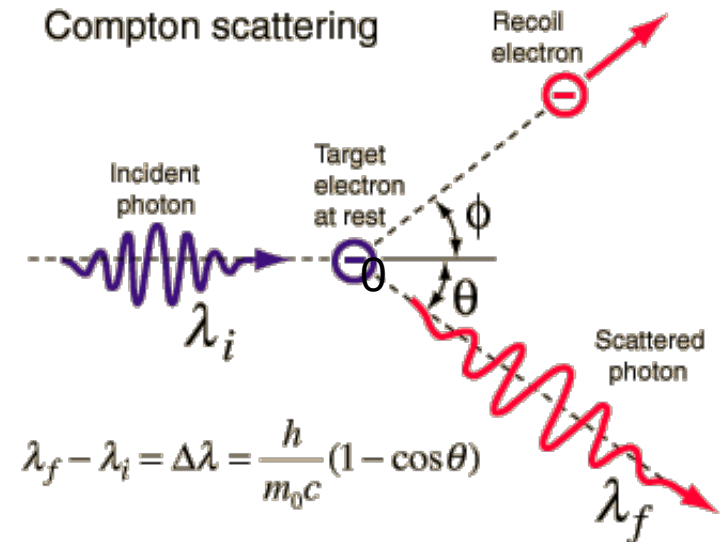
Pour une meilleure compréhension,
certaines explications pourront être
légèrement simplifiées/tronquées



La diffusion

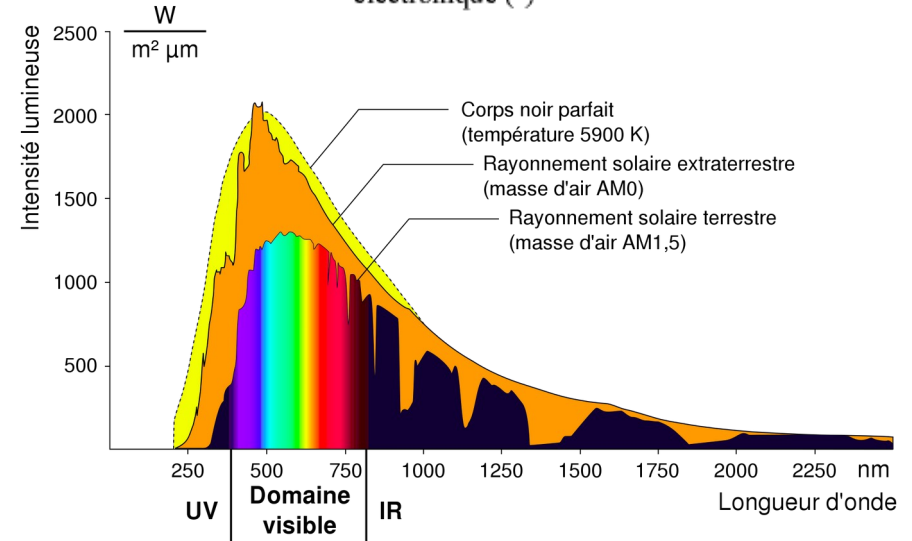
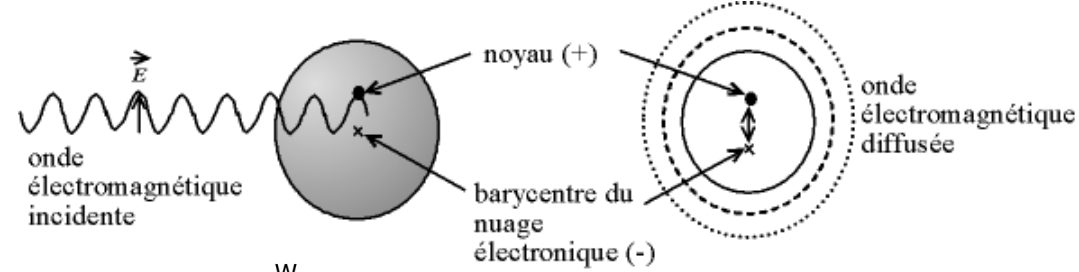
- Définition : **Dévi**ation d'un rayonnement dans diverses directions par une **interaction** avec d'autres objets
 - **Isotrope** (uniformément répartie dans toutes les directions) ou **anisotrope** (cas particulier : une fraction de l'onde incidente est retournée dans la direction d'où elle provient = **rétrodiffusion**)
 - **Élastique** (sans variation de fréquence) ou **inélastique** (avec variation de fréquence)
 - Modification ou pas de la **polarisation** du rayon incident
- Il existe de nombreux types de diffusion des ondes : Compton, Mie, Rayleigh, ...
- Existe également une **diffusion des particules**

- Exemple : la diffusion Compton
 - Collision entre un **photon** incident et un **électron** lié à un atome
 - Élastique si e^- faiblement lié, inélastique sinon
 - **Preuve supplémentaire de la dualité onde-corpuscule**
 - Prix Nobel 1927



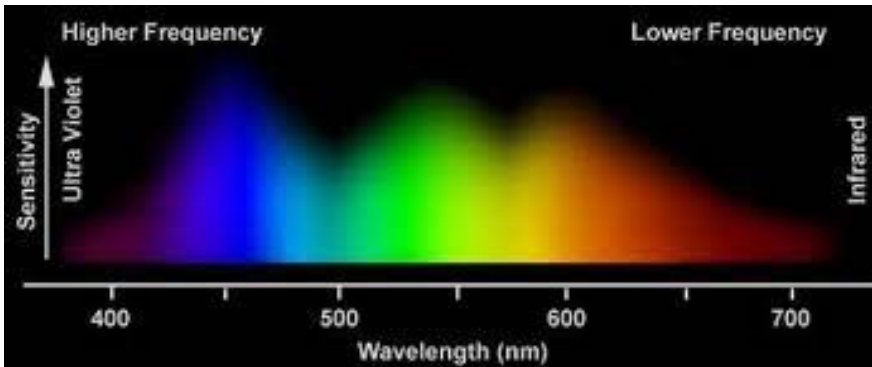
La couleur du ciel

- Résulte de l'interaction entre la lumière du Soleil et les molécules et particules de l'atmosphère terrestre
- Diffusion de Rayleigh :
 - Réémission **multidirectionnelle** d'ondes électromagnétiques lorsque de la lumière arrive sur une molécule / un atome
 - Diffusion proportionnelle à $1/\lambda^4$: **favorise les courtes longueur d'ondes**



Spectre d'irradiance solaire en fonction de la longueur d'onde au sommet de l'atmosphère (AM0) et au niveau de la mer (AM1,5)

- La lumière du Soleil contient peu de violet & l'œil humain est moins sensible au violet (« **effet Purkinje** ») → **bleu**



Sensibilité de l'œil humain en fonction de la longueur d'onde

L'indice optique

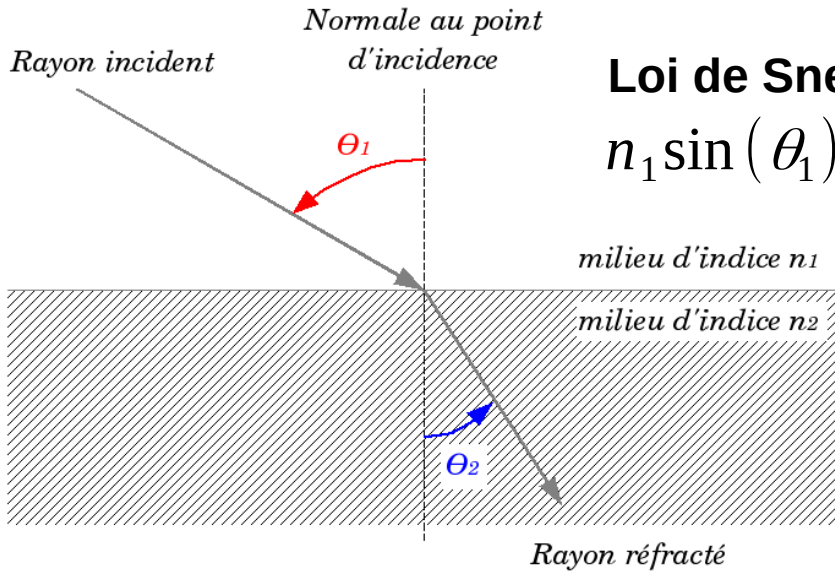
- Mesure la **vitesse de la lumière dans un milieu**
 - $n = c / v > 1 \Leftrightarrow v = c / n$
- **Réfraction** lorsque la lumière rencontre un « **dioptre** »
- Ex : $n_{\text{eau}} : 1,33$, $n_{\text{verre}} > 1,5$



Fluctuations d'indice dues à des fluctuations de densité liées au mouvement turbulent de l'air

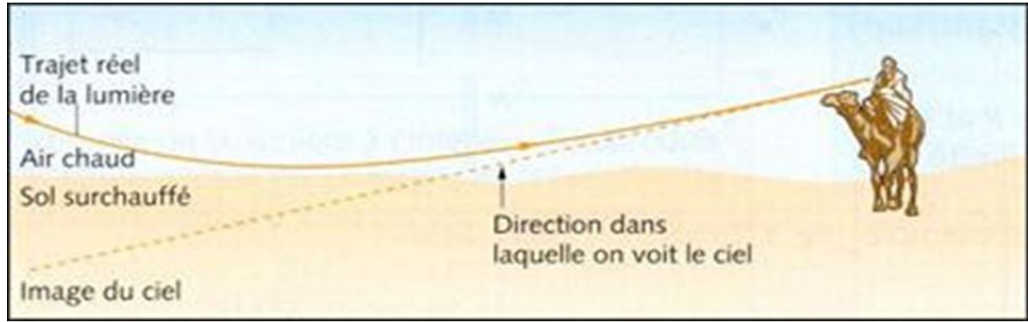
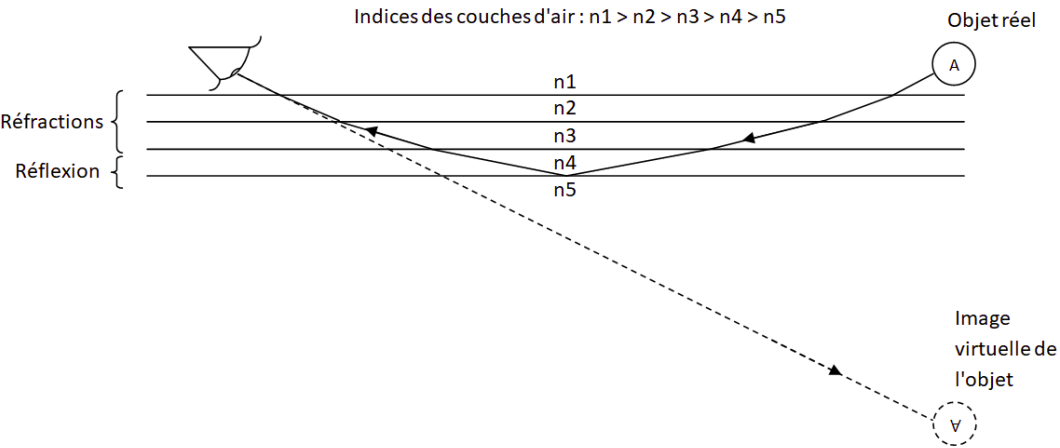
Loi de Snell-Descartes

$$n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2)$$

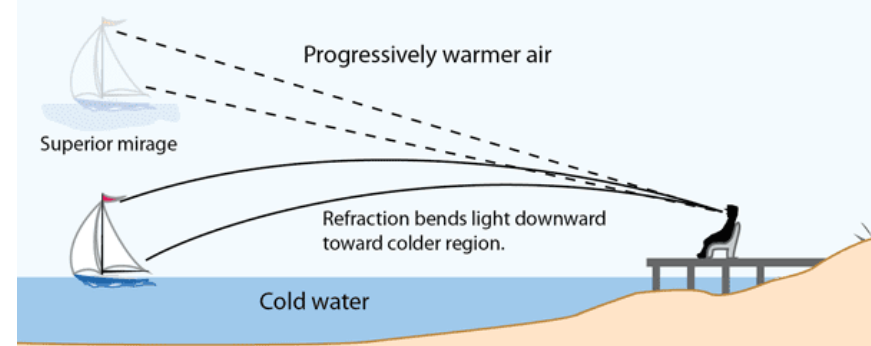


Les mirages

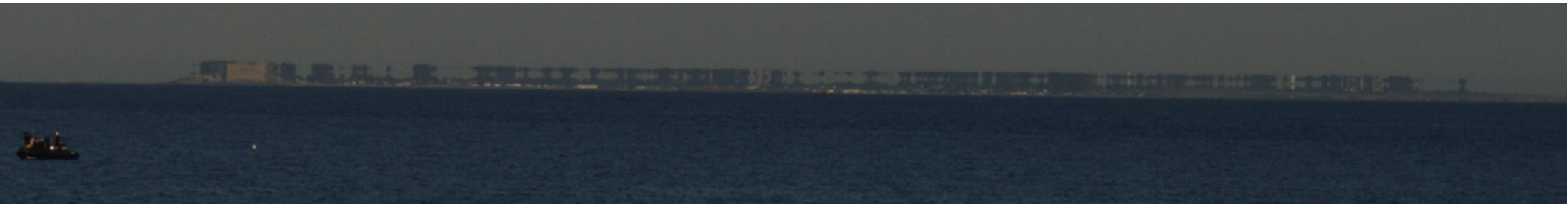
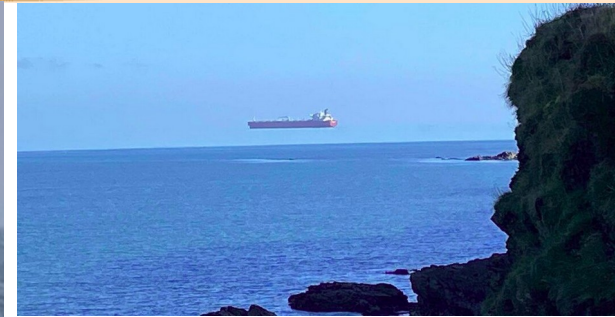
L'air **plus chaud** près du sol
a un **indice optique plus faible** que l'air moins chaud
au-dessus
→ **mirage « inférieur »**



Autres mirages



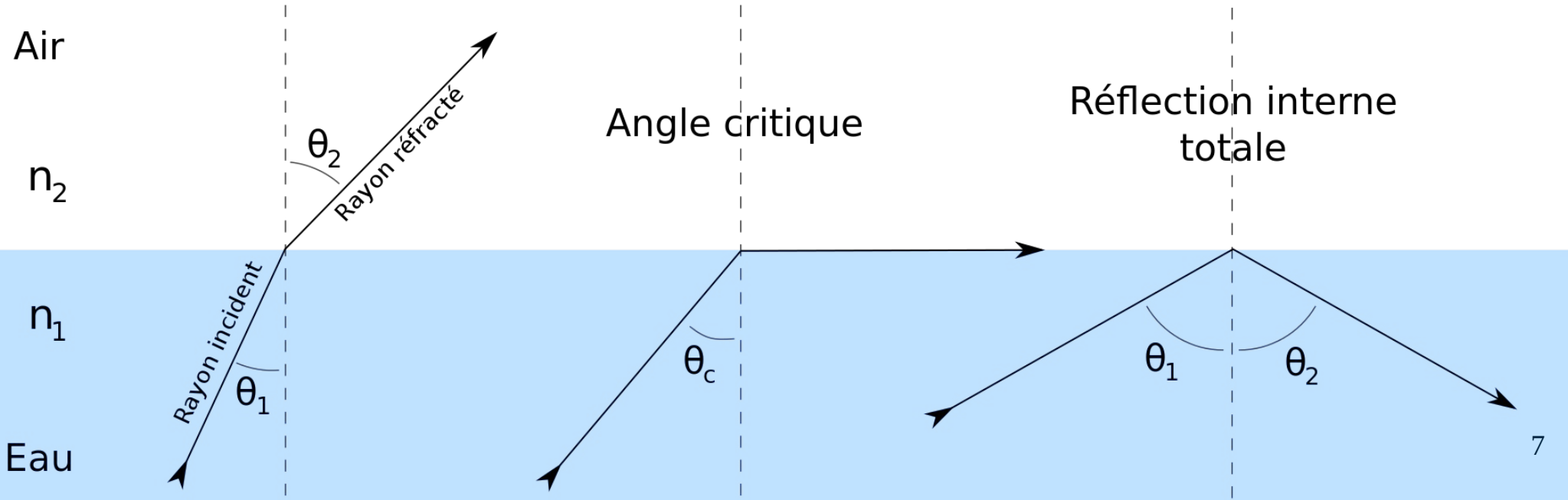
Mirage « supérieur » :
configuration inverse
(air plus froid près de la surface)



Fata Morgana (« fée Morgane ») = combinaison des 2 phénomènes – Presqu'île de Quiberon (Morbihan, France)

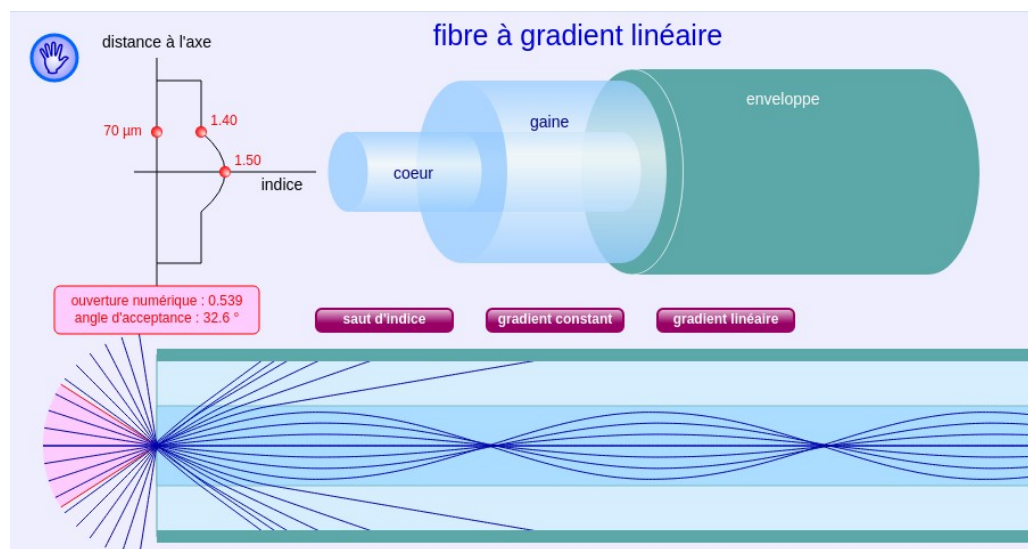
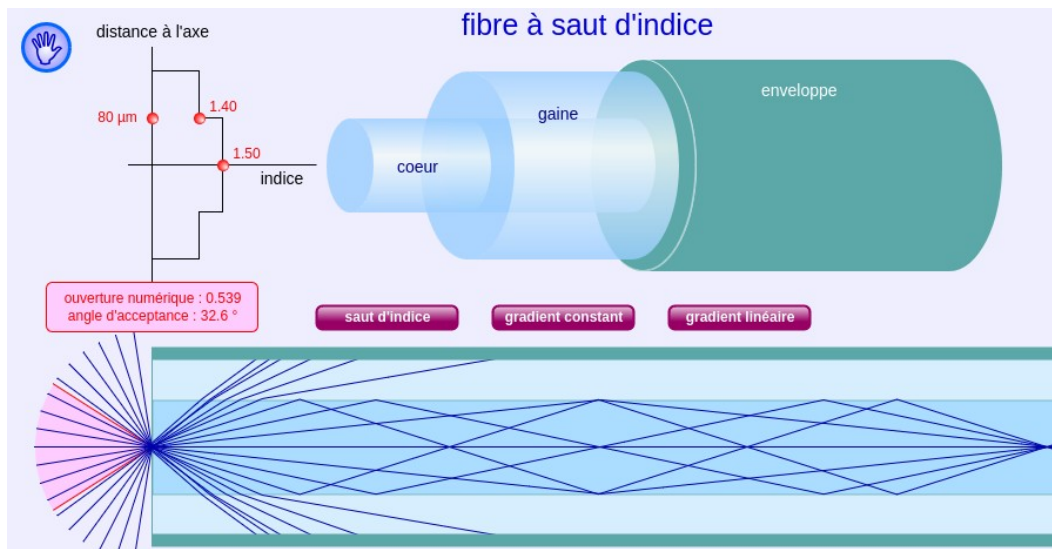
Réflexions sur la réfraction

- Si $n_1 > n_2$, $\sin(\theta_2)$ peut être **supérieur à 1** : impossible !
$$\sin(\theta_2) = \frac{n_1}{n_2} \sin(\theta_1)$$
- Plus de **réfraction, réflexion totale**



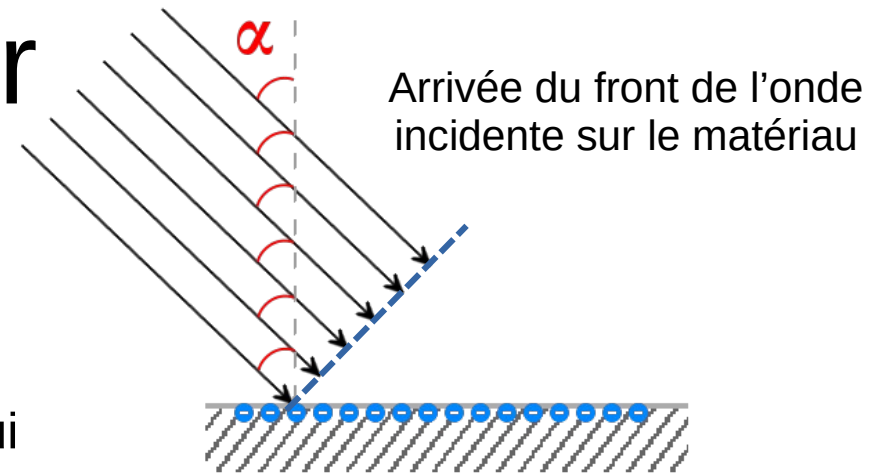
Les fibres optiques

- Constituées de **3 zones** : **enveloppe extérieure**, **gaine** et **cœur**
- On distingue **2 grands types** :
 - à **saut d'indice** : discontinuité d'indice entre cœur et gaine → trajet **anguleux (réflexions totales)**
 - à **gradient d'indice** : continuité d'indice entre cœur et gaine → trajet **courbe**

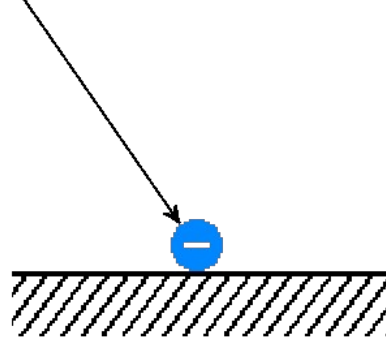


Réflexion par un miroir

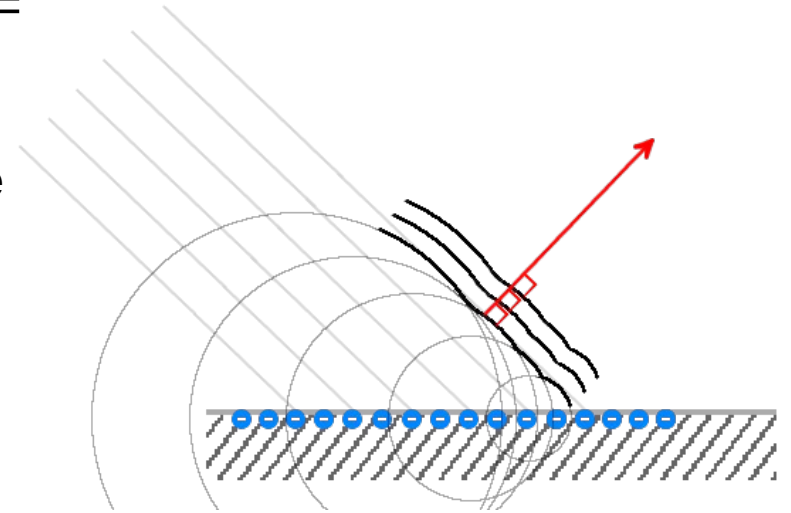
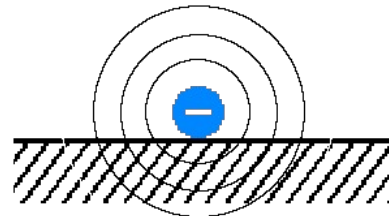
- Quand de la lumière illumine matériau, elle **interagit avec ses électrons**
 - Rayon lumineux **absorbé** puis **réémis** (= **diffusion**)
- Les métaux contiennent des **électrons libres**, qui peuvent se déplacer dans la structure cristalline = « **liaison métallique** »
 - Les électrons des métaux peuvent absorber puis réémettre **presque toutes les longueurs d'onde**



1. Absorption



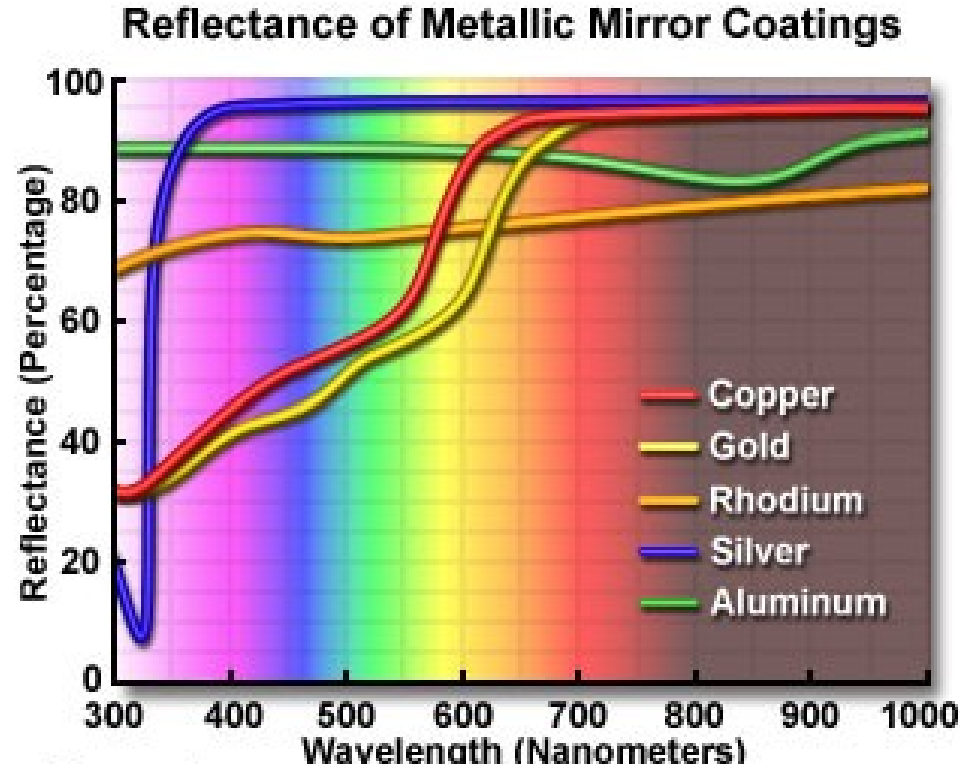
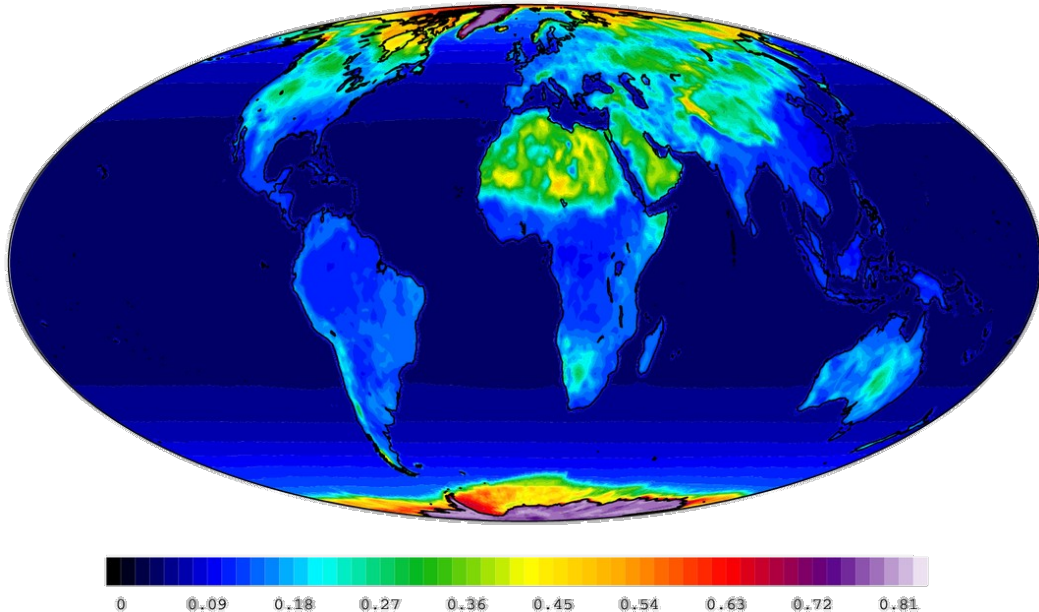
2. Réémission



Réémissions « étagées » et apparition du front de l'onde réfléchi

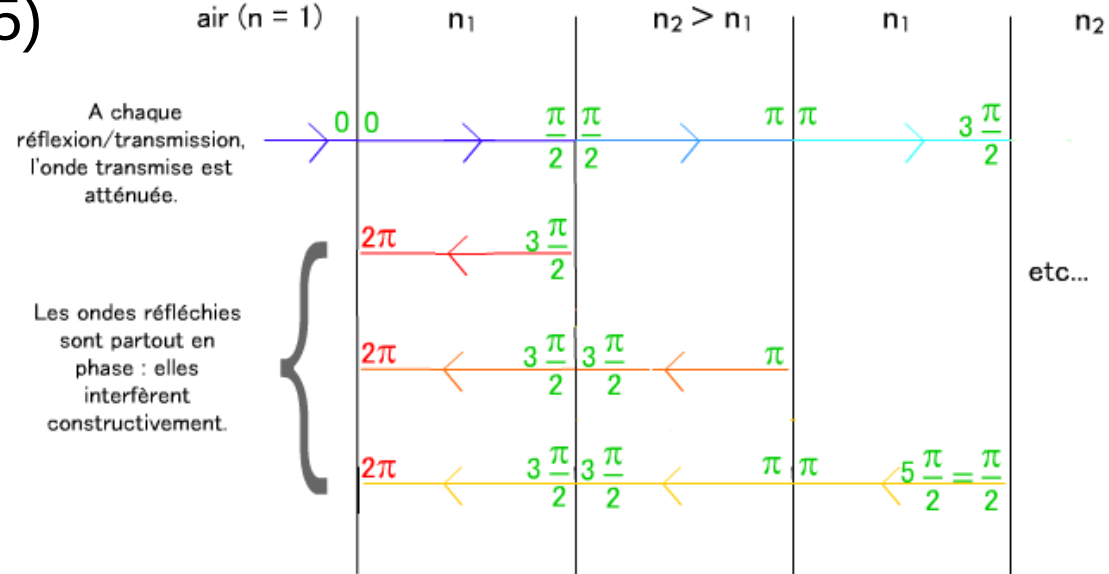
Réflectance

- Ou « **facteur de réflexion** » = proportion de lumière réfléchiée par une surface
 - Un miroir ne reflète **jamais la totalité** de la lumière reçue
- Dépend de la longueur d'onde → **spectre de réflexion**
- En climatologie, on parle d' « **albédo** »



Miroirs interférentiels multicouches

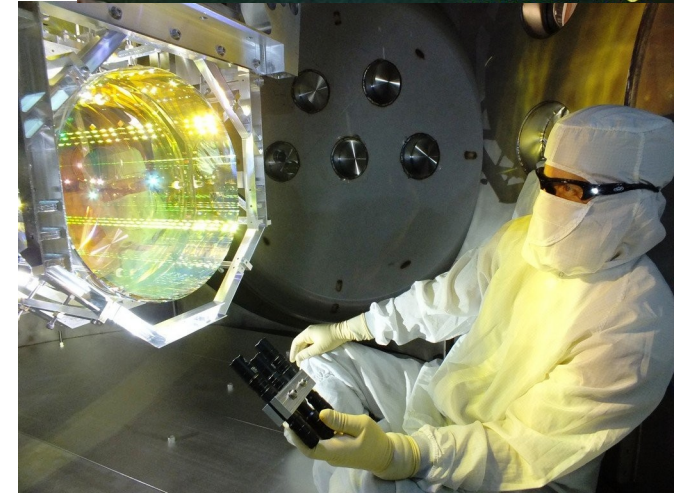
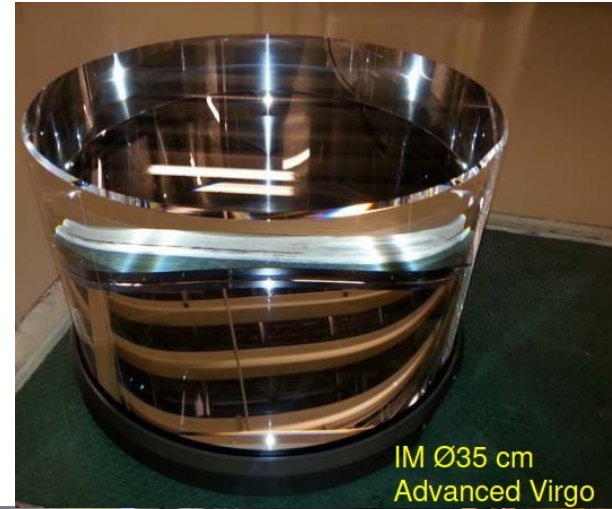
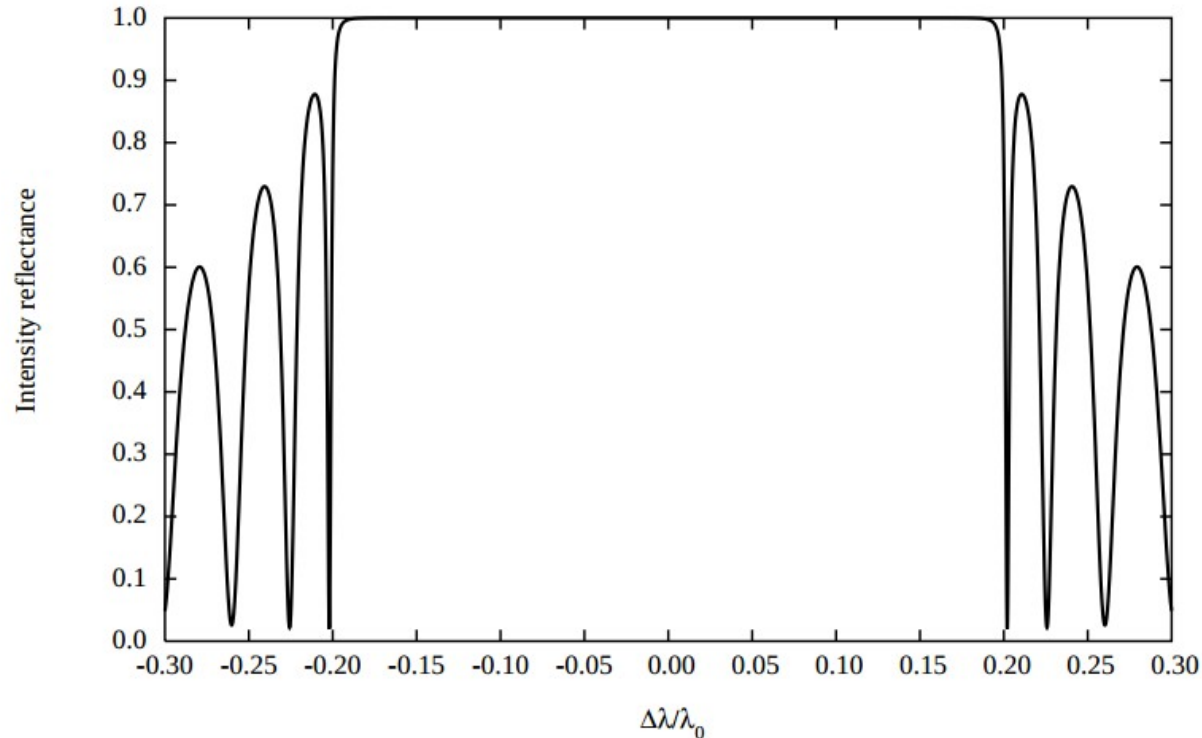
- **Miroir de Bragg** (prix Nobel 1915)
- = succession de surfaces planes et transparentes, d'**indices de réfraction** différents
 - permet de réfléchir la **quasi-totalité de l'énergie incidente**
 - meilleurs miroirs



- Chaque couche **réfléchit et transmet** une partie de la lumière
- Toutes les ondes réfléchies sont **en phase** → **interférences constructives** pour une longueur d'onde donnée

Les miroirs de Virgo

- Si si, ce sont bien les ~meilleurs miroirs du monde... (mais $\lambda_0 = 1064$ nm)

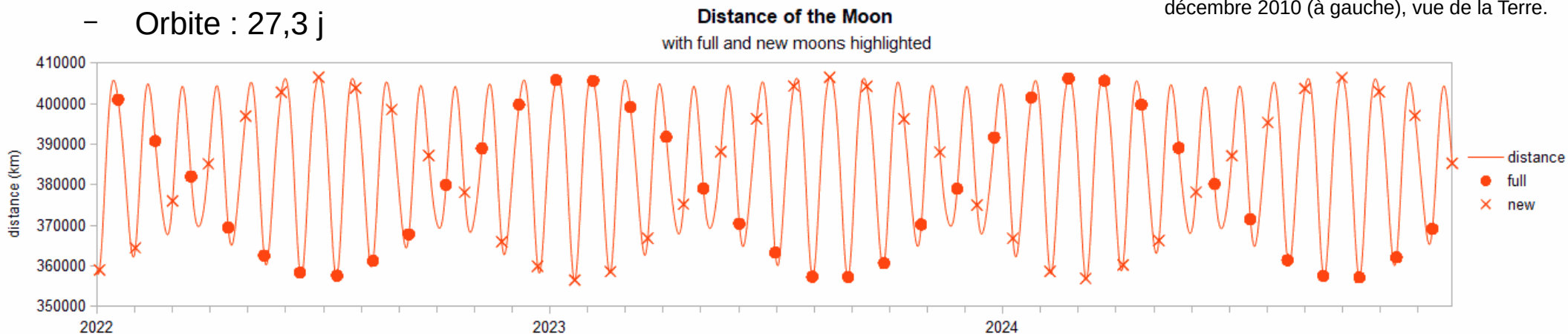


La Lune

- La Lune n'émet pas de lumière, elle **réfléchit** celle reçue du Soleil
- **Excentricité** de l'orbite de la Lune : 0,05 (entre 0,025 et 0,077)
- Distance : 362 000 – 406 700 km
- $v = 3600$ km/h
- Les variations de la **distance** sont **décorrélées** de la **phase**
 - Pleine Lune : 29,5j
 - Orbite : 27,3 j



« Super lune » du 19 mars 2011 (à droite), comparée à une lune plus moyenne du 20 décembre 2010 (à gauche), vue de la Terre.



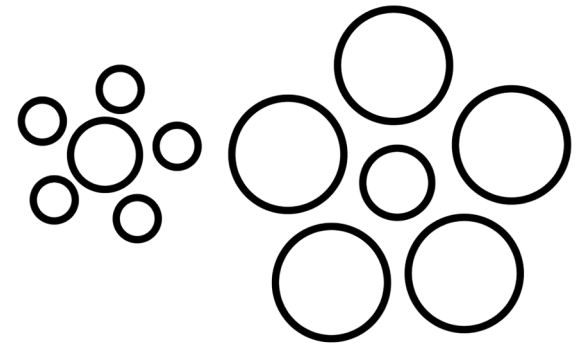
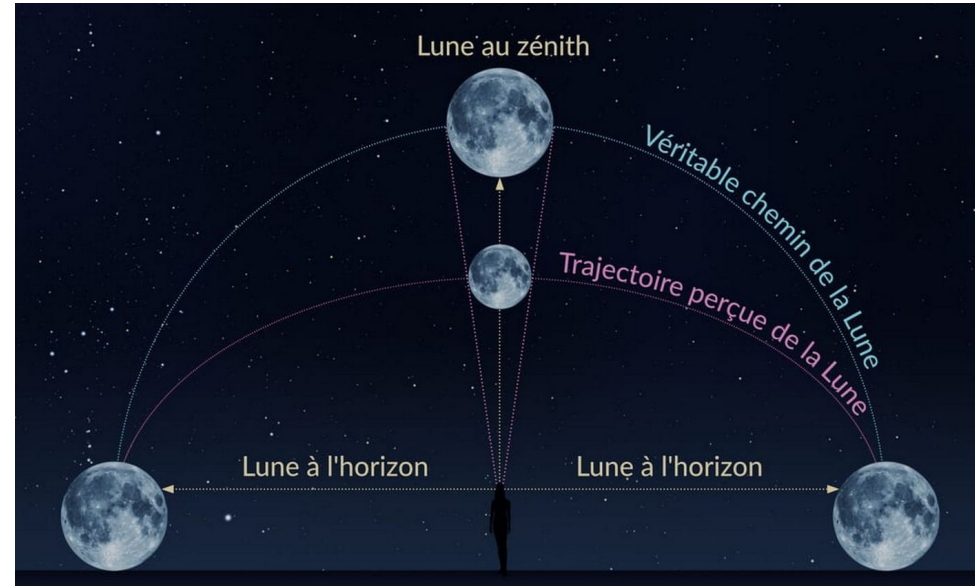
Les super lunes sont les points marqués le plus près du bas du graphique.

Bonus : l'illusion lunaire

La Lune paraît plus grosse lorsqu'elle est près de l'horizon qu'à son zénith

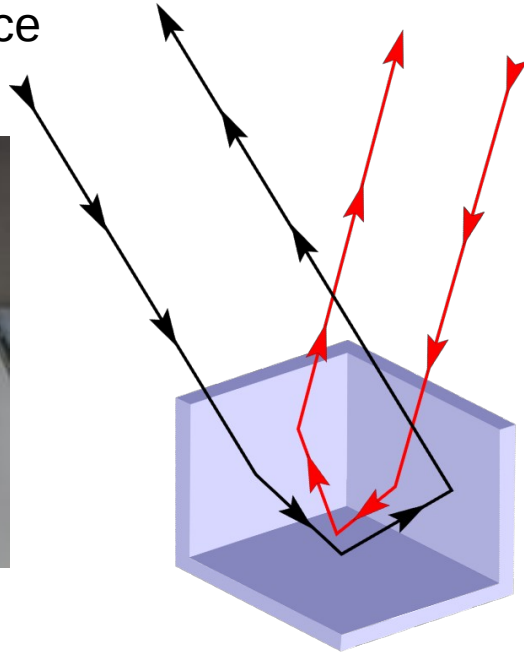
1. **Ibn Al-Haytham** : la **voûte céleste** est perçue comme aplatie : au zénith, la Lune nous semble plus proche qu'à l'horizon, et donc plus petite
2. **Illusion d'Ebbinghaus** : la Lune peut paraître plus grosse lorsqu'elle est entourée d'arbres, de maisons, etc. que lorsqu'elle est au milieu de l'immensité du ciel
3. **Micropsie de convergence** : notre cerveau prend en compte la focalisation de nos yeux pour estimer la taille d'un objet :
 - À l'horizon (= distance perçue comme infinie en raison de l'environnement), nos yeux n'accommodent pas (*punctum remotum*)
 - Au zénith, pas de repère, accommodation naturelle à quelques mètres ; la Lune, plus lointaine, est alors perçue comme plus petite

Aucune explication vraiment satisfaisante...

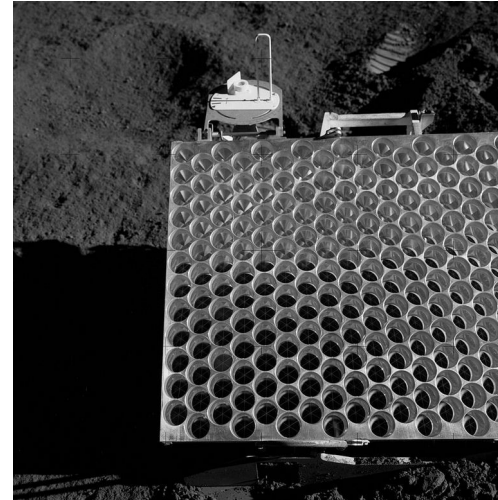


Catadioptres

- Un système **catadioptrique** réfléchit un faisceau lumineux (en général visible ou dans l'infrarouge proche) **dans la direction du flux reçu, quel que soit l'angle d'incidence**
- Structure de « coins de cubes » (3 surfaces perpendiculaires deux à deux)
- Inventé en 1917 à Nice



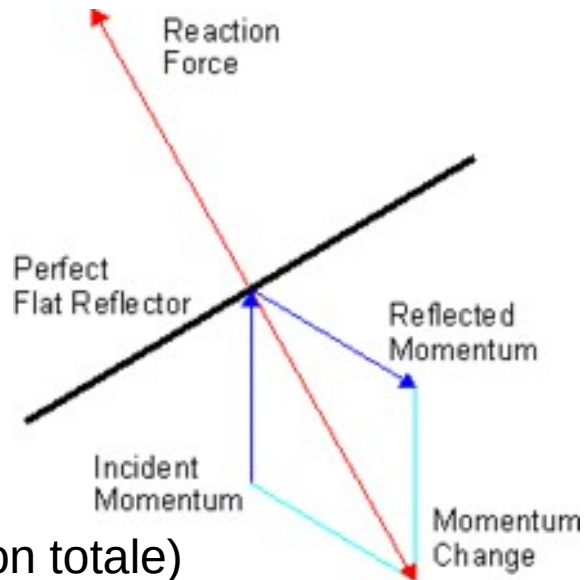
- Il y a des réflecteurs sur la Lune, utilisés pour mesurer la distance Terre-Lune avec une **précision centimétrique**
- $D_{\text{moy}} = 384\,467$ kilomètres
- $V_{\text{éloignement}} = 3,8$ cm/an



Mission indienne Chandrayaan-3 (07/23)

La pression de rayonnement

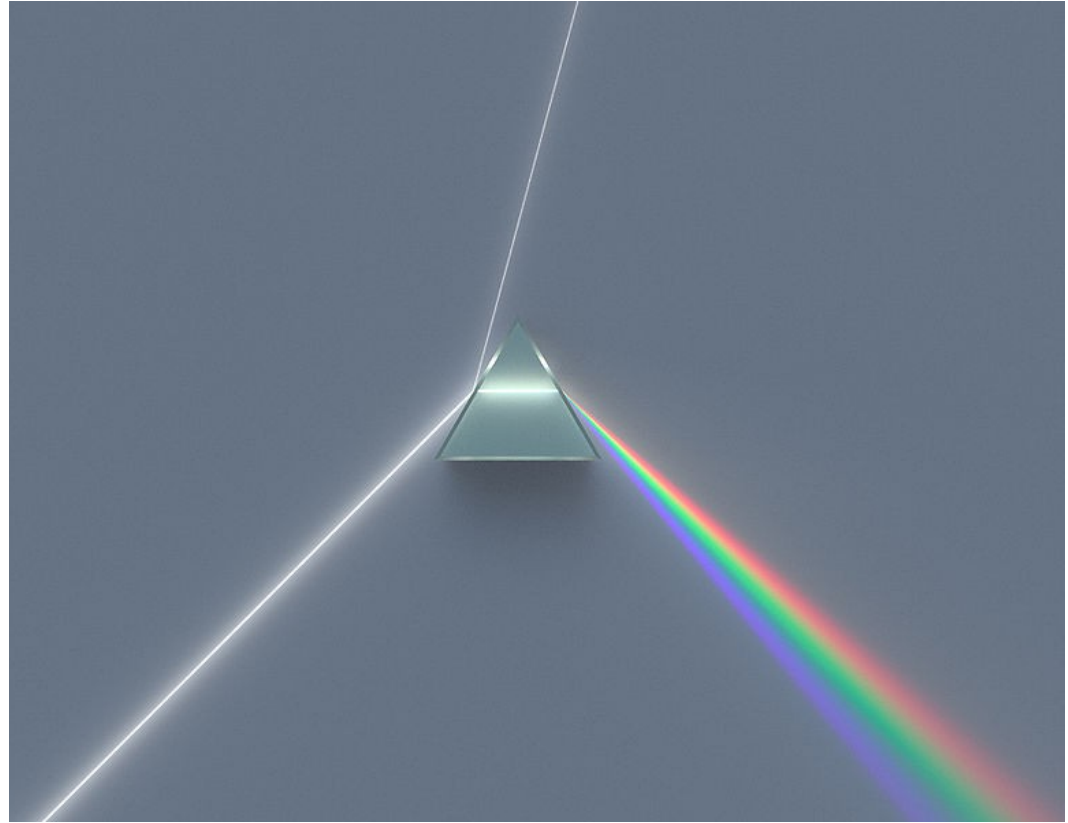
- Ou « **pression radiative** » = transfert de quantité de mouvement ($p=h/\lambda$)
- **Analogue à la pression d'un gaz** sur une paroi : même unité = pascal ($\text{Pa} = \text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$)



- « **Anomalie Pioneer** » : **accélération inexplicable** des sondes spatiales Pioneer 10 et 11 mesurée entre 1979 et 2002
- Explication en 2011 : **pression du rayonnement IR** des générateurs électriques

La dispersion

- L'**indice** dépend de la longueur d'onde :
 - **Formule de Cauchy**
(n décroissant avec λ)
$$n(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4} + \frac{D}{\lambda^6} + \dots$$
- → les couleurs sont **déviées différemment**
= « **dispersion** »

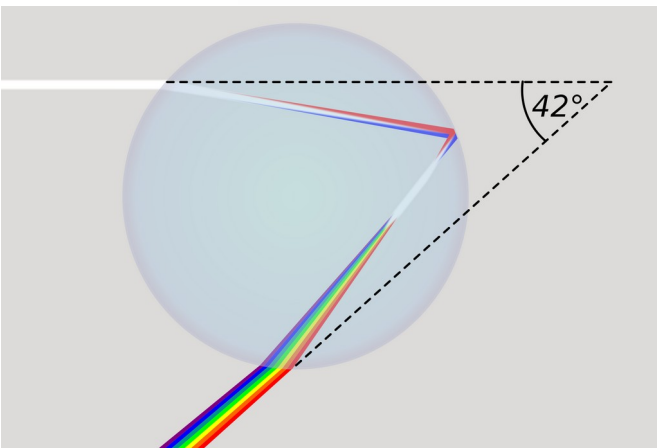
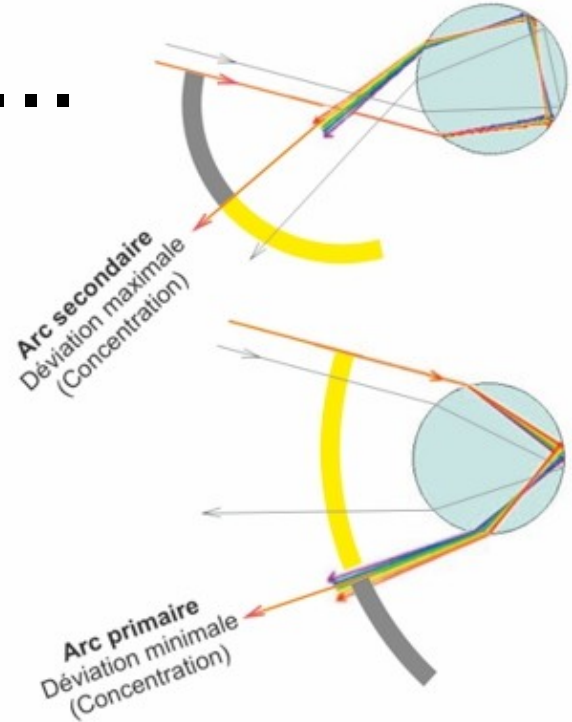
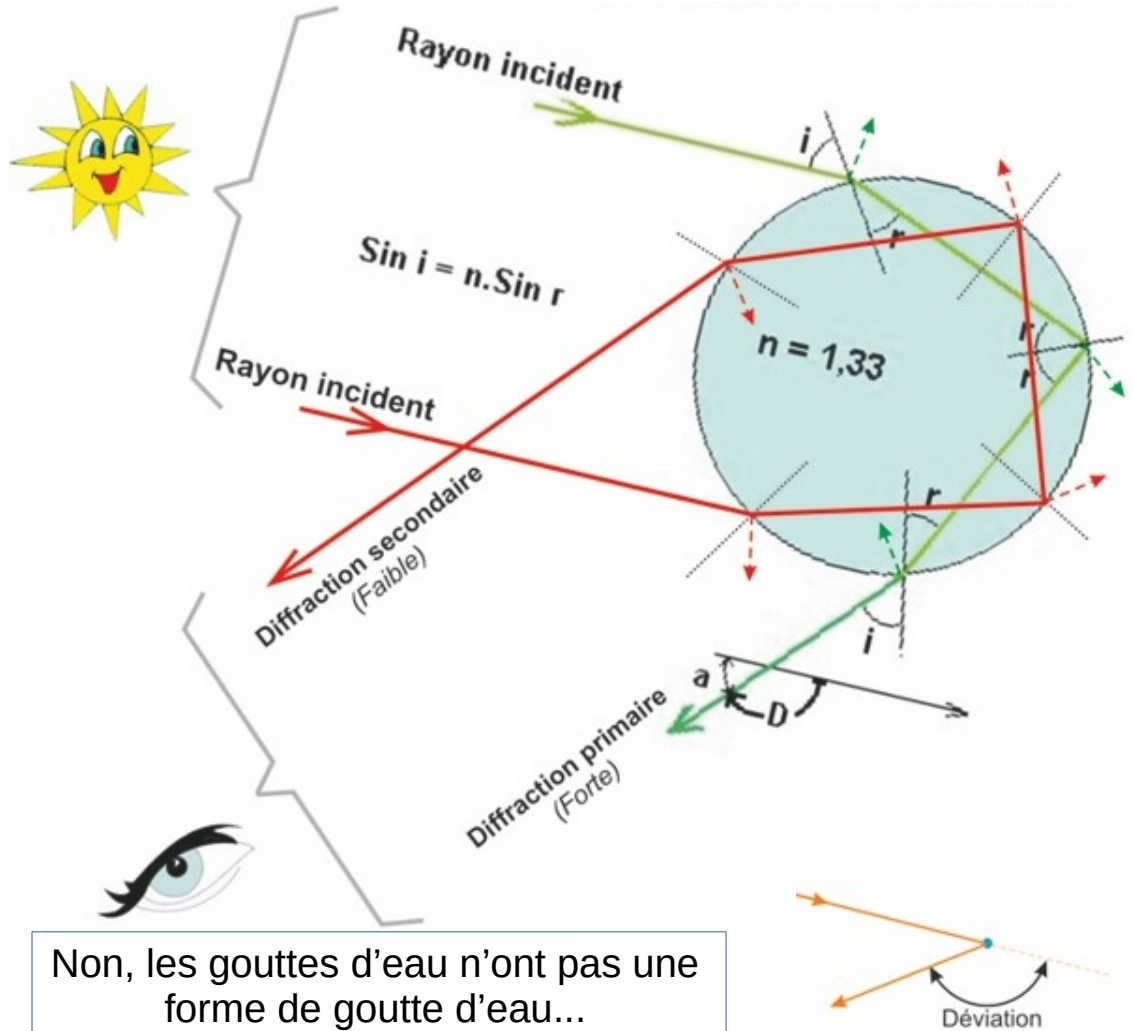


L'arc-en-ciel

- Phénomène **optique** (non matériel) visible dans la direction opposée au Soleil quand il brille pendant la **pluie** ou quand des **gouttelettes d'eau sont en suspension** dans l'air
- **Arc de cercle** coloré présentant une **transition continue** du rouge à l'extérieur au violet à l'intérieur
- La position **apparente** dépend des positions de l'observateur et du Soleil :
 - L'arc-en-ciel se déplace avec l'observateur
 - il est impossible d'atteindre le pied de l'arc-en-ciel et d'y trouver le trésor...
- Arc-en-ciel dû à la **réfraction**, la **réflexion** et la **dispersion**



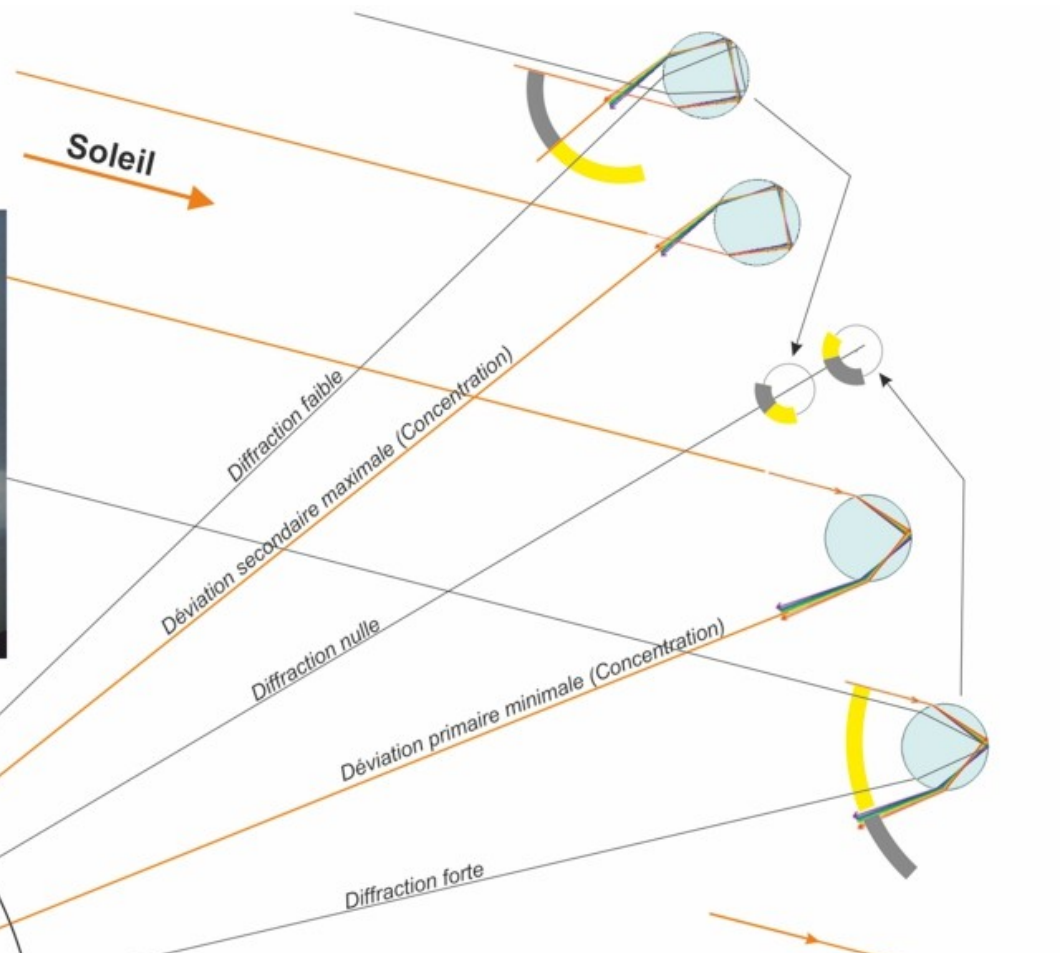
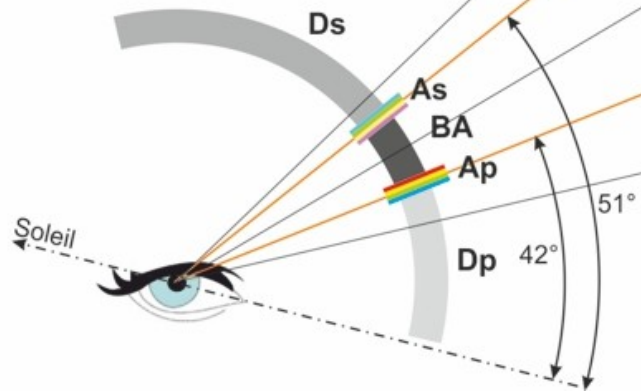
Arcs secondaires, tertiaires, ...



Non, les gouttes d'eau n'ont pas une forme de goutte d'eau...

Arc en ciel

Analyse des différentes zones



- Dp Diffraction primaire
- Ap Arc primaire
- BA Bande d'Alexandre (Sans diffraction)
- As Arc secondaire
- Ds Diffraction secondaire