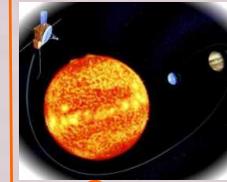
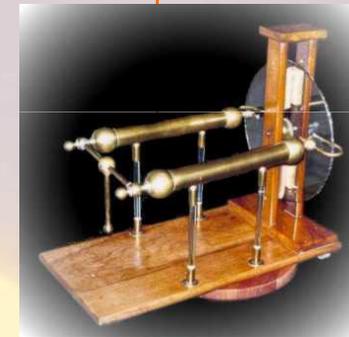


Lycée *Clemenceau*

PCSI 1 - Physique



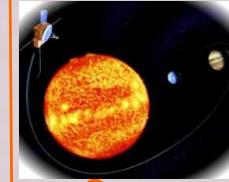
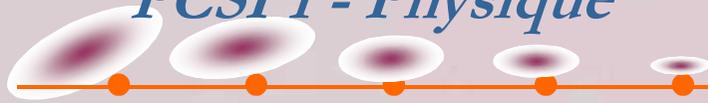
PCSI 1 (O.Granier)



Les lois fondamentales de l'optique géométrique

Lycée *Clemenceau*

PCSI 1 - Physique



L'optique consiste en l'étude des propriétés de la lumière.

L'optique **géométrique**, qui n'est valable que lorsque la lumière n'est pas confrontée à des obstacles de petites tailles, permet d'étudier la trajectoire des rayons lumineux et la formation d'images par des instruments d'optique : lentilles, miroirs, lunettes astronomiques, télescopes, microscopes, etc.

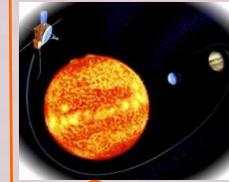
Dès lors que la lumière est confrontée à des obstacles de petites tailles, le trajet des rayons lumineux est plus compliqué.

On obtient des phénomènes **d'interférences et de diffraction**.

La lumière doit être décrite comme une onde électromagnétique (domaine de **l'optique physique**).

Grands noms





1- La dualité onde-corpuscule

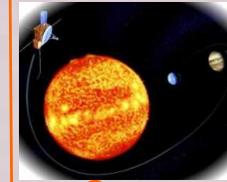
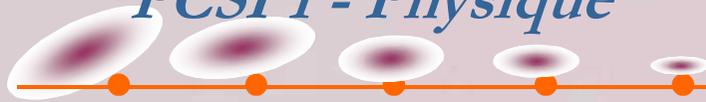
Aspect corpusculaire : Planck et Einstein (1906) ont développé un modèle corpusculaire : la lumière est une sorte de flux de « grains d'énergie », appelés **photons**.

Chacun de ces photons :

- est de masse nulle
- se déplace à une vitesse $c = 2,998 \cdot 10^8 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ dans le vide
- son énergie est $E = h f$, où h est la constante de Planck et f la fréquence du photon (fréquence de la « lumière associée »).

C'est ce modèle corpusculaire quantique qui permet d'interpréter certains phénomènes comme les interactions lumière-matière : **l'effet photoélectrique** par exemple.

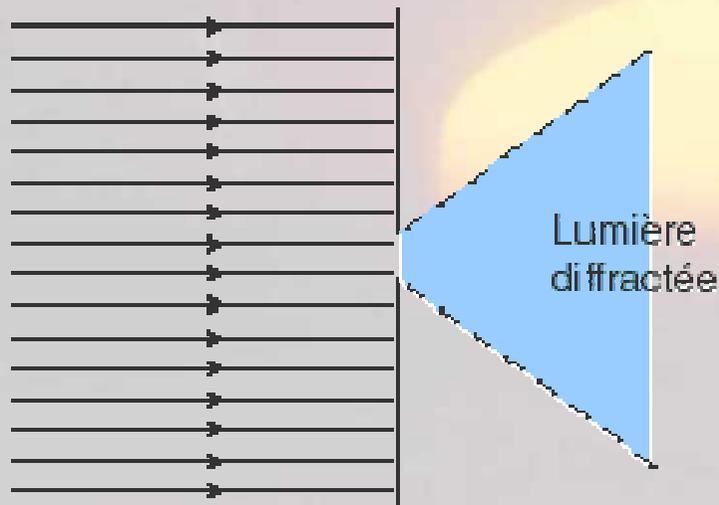




Aspect ondulatoire : Huygens (fin XVII^{ème}), puis Fresnel (fin XVIII^{ème}) et Maxwell (fin XIX^{ème}) développent un modèle ondulatoire.

La lumière est une **onde électromagnétique**, c'est à dire une association (champ électrique + champ magnétique), qui oscille sinusoidalement en fonction du temps et de l'espace et se propage à la vitesse :

$$c = 2,998.10^8 \text{m.s}^{-1} \text{ (dans le vide)}$$



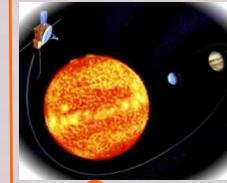
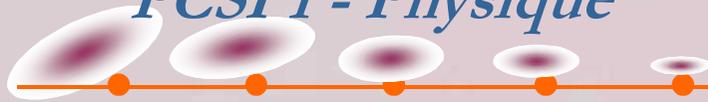
C'est ce modèle ondulatoire qui permet d'interpréter certains phénomènes comme les interférences et la diffraction.

[Animations](#)
[interférences](#)



Lycée *Clemenceau*

PCSI 1 - Physique



Dualité onde - corpuscule : certaines expériences ont montré que la lumière n'est ni seulement un flux de photons, ni seulement une onde, mais **les deux à la fois**.

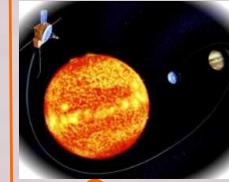
C'est la **dualité onde-corpuscule**, développée par Louis De Broglie (1924).

On peut par exemple réaliser des figures d'interférences avec des électrons.

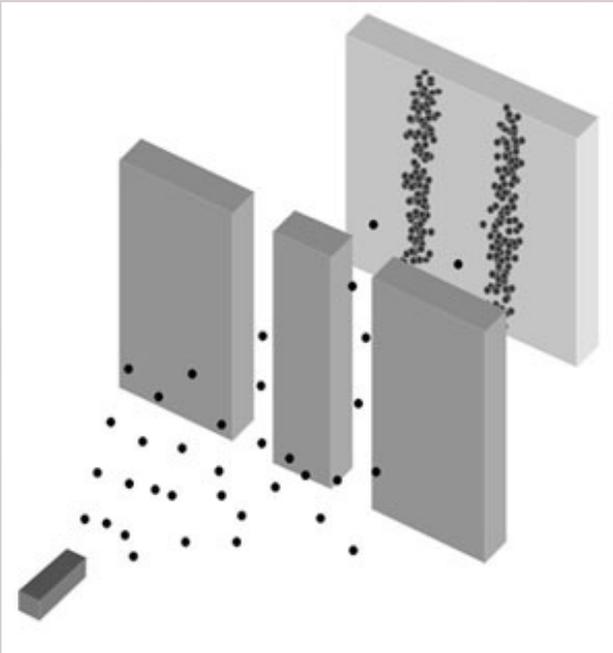


Lycée *Clemenceau*

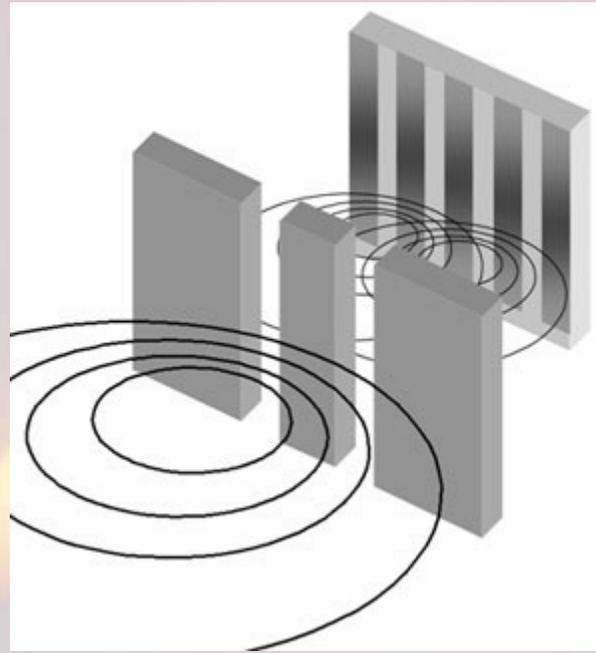
PCSI 1 - Physique



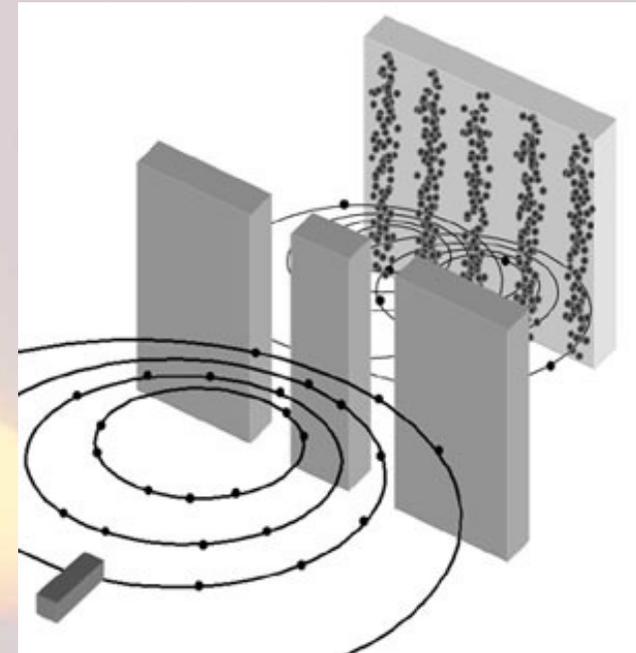
Expérience des trous d'Young



Expérience avec des billes



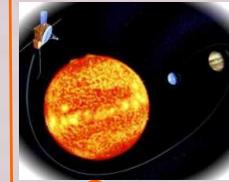
Expérience avec des ondes



Expérience avec des quanta

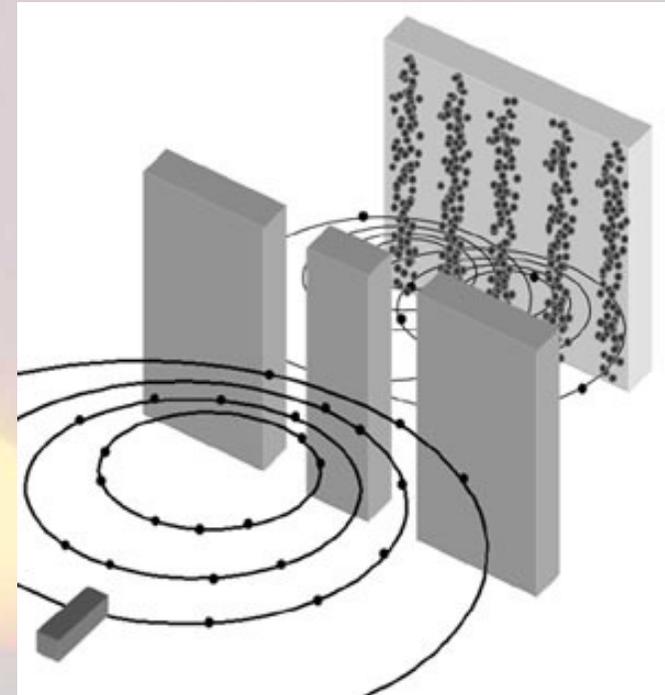
Lycée *Clemenceau*

PCSI 1 - Physique



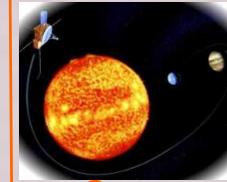
Dans un faisceau laser, des milliards
de photons interfèrent
Que se passe-t-il avec 1 seul photon ?
Interfère-t-il avec lui-même ?

La mécanique quantique répond **OUI**
car ce qui interfère c'est l'onde de
probabilité du photon

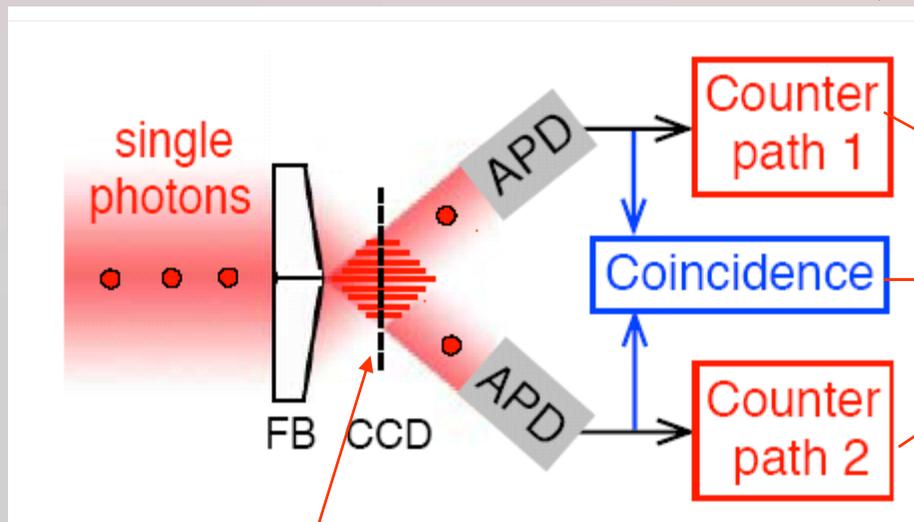


Lycée *Clemenceau*

PCSI 1 - Physique

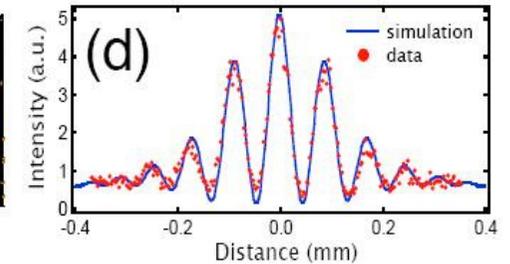
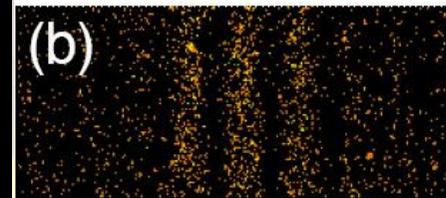
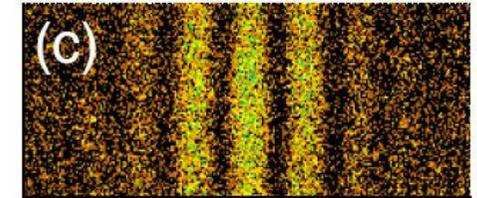
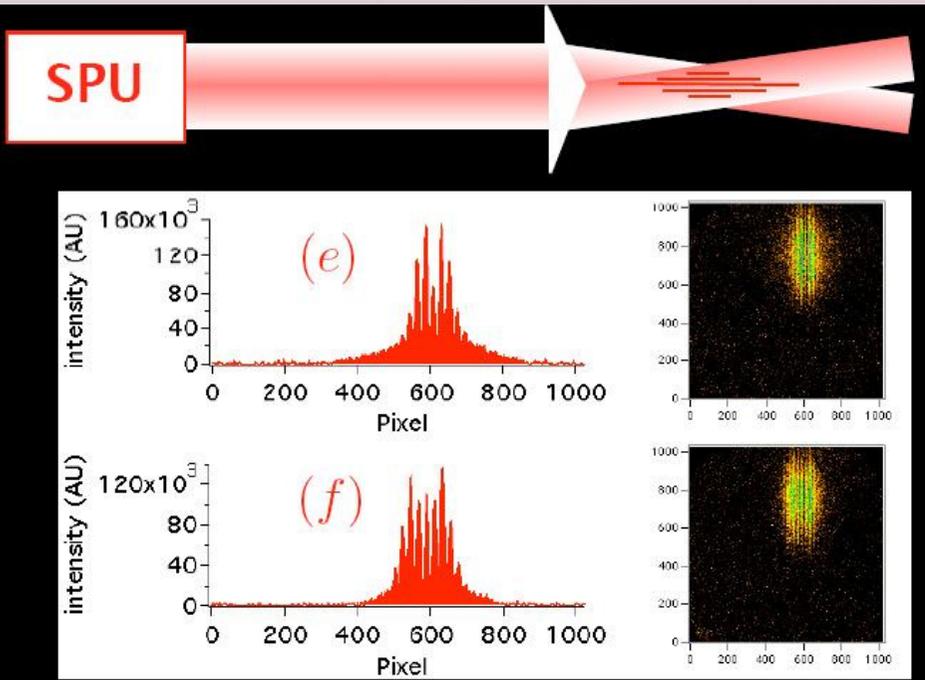
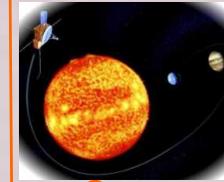


Cette expérience a pu être réalisée pour la première fois en 2004 par l'équipe de Jean-François Roch (Laboratoire de photonique quantique de l'ENS Cachan)

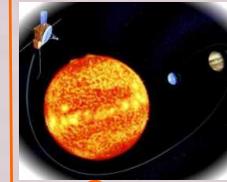


Dispositif permettant de connaître par quel trou chaque photon est passé

Dispositif permettant de détecter les franges d'interférence



- La mesure des coïncidences a clairement montré que chaque photon passe par les deux trous à la fois !!!



2 - Quelques caractéristiques de la lumière :

Vitesse de propagation dans le vide :

$$c = 299\,792\,458 \text{ m.s}^{-1} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}.$$

La lumière peut se propager même en l'absence de milieu matériel, c'est-à-dire même dans le vide (contrairement aux sons ou aux vagues de la mer).

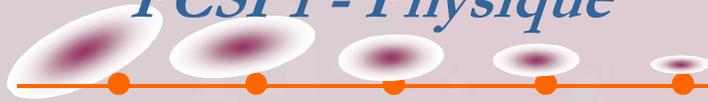
La lumière étant une onde, on définit :

- * Sa **période** temporelle T (en s),
- * Sa **fréquence** $f = 1 / T$ (en s^{-1} ou Hz)
- * Sa **longueur d'onde** spatiale λ (en m)

$$\lambda = cT = \frac{c}{f}$$

Lycée **Clemenceau**

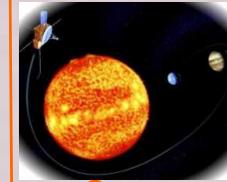
PCSI 1 - Physique



Spectre électromagnétique

Les couleurs





Dans un milieu matériel :

La lumière se propage à une vitesse v plus faible que dans le vide. Si v désigne la vitesse de la lumière dans le milieu, on définit **l'indice de réfraction** n du milieu par :

$$n = \frac{c}{v} > 1$$

L'air a un indice de réfraction de l'ordre de 1,000293 (à 1 bar et 0°C), qui sera souvent assimilé à 1.

Indice du verre : de 1,5 à 1,7 (selon la nature du verre)

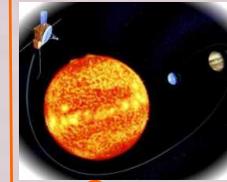
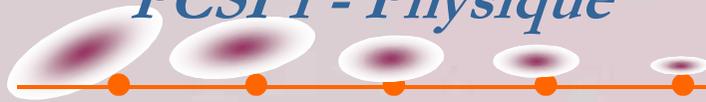
Indice de l'eau : de l'ordre de 1,33

Cette vitesse de propagation de la lumière dans un milieu matériel dépend des propriétés microscopiques du milieu et de la longueur d'onde (c'est-à-dire de la couleur) de la lumière.



Lycée *Clemenceau*

PCSI 1 - Physique



On peut dans certains cas modéliser l'indice n par la **loi de Cauchy** :

$$n(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2}$$

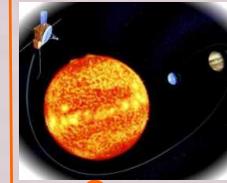
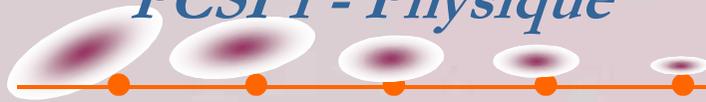
où A et B dépendent des propriétés microscopiques du milieu (constantes phénoménologiques)

Comme : $\lambda_{bleu} < \lambda_{rouge}$, $n_{bleu} > n_{rouge}$ et $v_{bleu} < v_{rouge}$

La lumière bleue se propage moins vite que la lumière rouge (contrairement au vide où toutes les couleurs se propagent toujours à la même vitesse).

C'est le phénomène de **dispersion de la lumière** **ANIMATION** (prisme)





3 - Les sources de lumière :

La sensibilité de l'œil couvre environ un domaine de 400 nm à 750 nm, avec un maximum de sensibilité pour environ 560 nm (jaune-vert).

Sources à spectre continu :

Exemples : Soleil, ampoules électriques à filament, etc.

Ces sources de lumière fonctionnent sur le principe du **rayonnement du corps noir**.

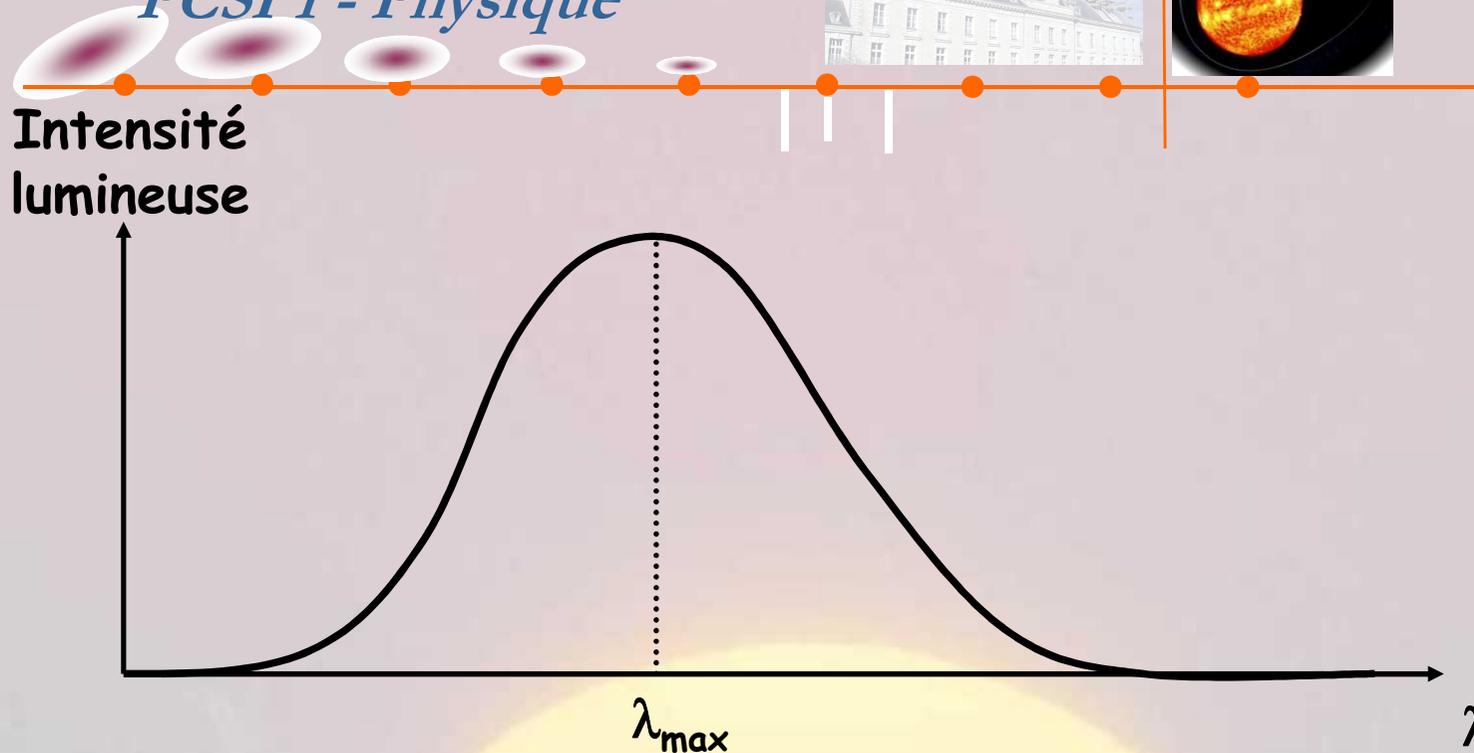
Tout corps porté à l'incandescence et maintenu à une température T constante, émet un rayonnement électromagnétique formant un large spectre continu.

Le spectre de lumière émise a l'allure suivante, où l'on représente l'intensité lumineuse spectrale émise en fonction de la couleur :



Lycée Clemenceau

PCSI 1 - Physique



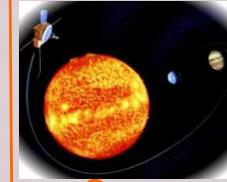
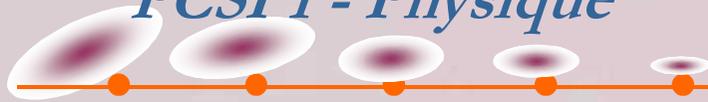
La loi de Wien relie la longueur d'onde du maximum d'intensité lumineuse émise à la température du corps noir :

$$\lambda_{\max} = \frac{cste}{T}$$

Plus un corps est chaud, plus son maximum d'intensité se trouve vers le bleu et l'UV.

Lycée *Clemenceau*

PCSI 1 - Physique



Source à spectres de raies :

Exemples : tubes à néon, lampes à vapeur de mercure, de sodium, d'hydrogène, ... etc.

Ces sources de lumière fonctionnent sur le principe de **l'émission spontanée** par des atomes gazeux.

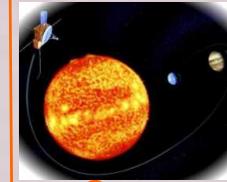
On excite les atomes gazeux de la lampe par des décharges électriques. Le retour dans les états d'énergie inférieure s'effectue spontanément par émission de photons.

Les niveaux d'énergie des atomes étant quantifiés, on obtient une lumière émise formée de raies étroites de lumière.



Lycée *Clemenceau*

PCSI 1 - Physique



Niveaux
excités

Excitation
par
décharge

Relaxation
par
émission de
lumière

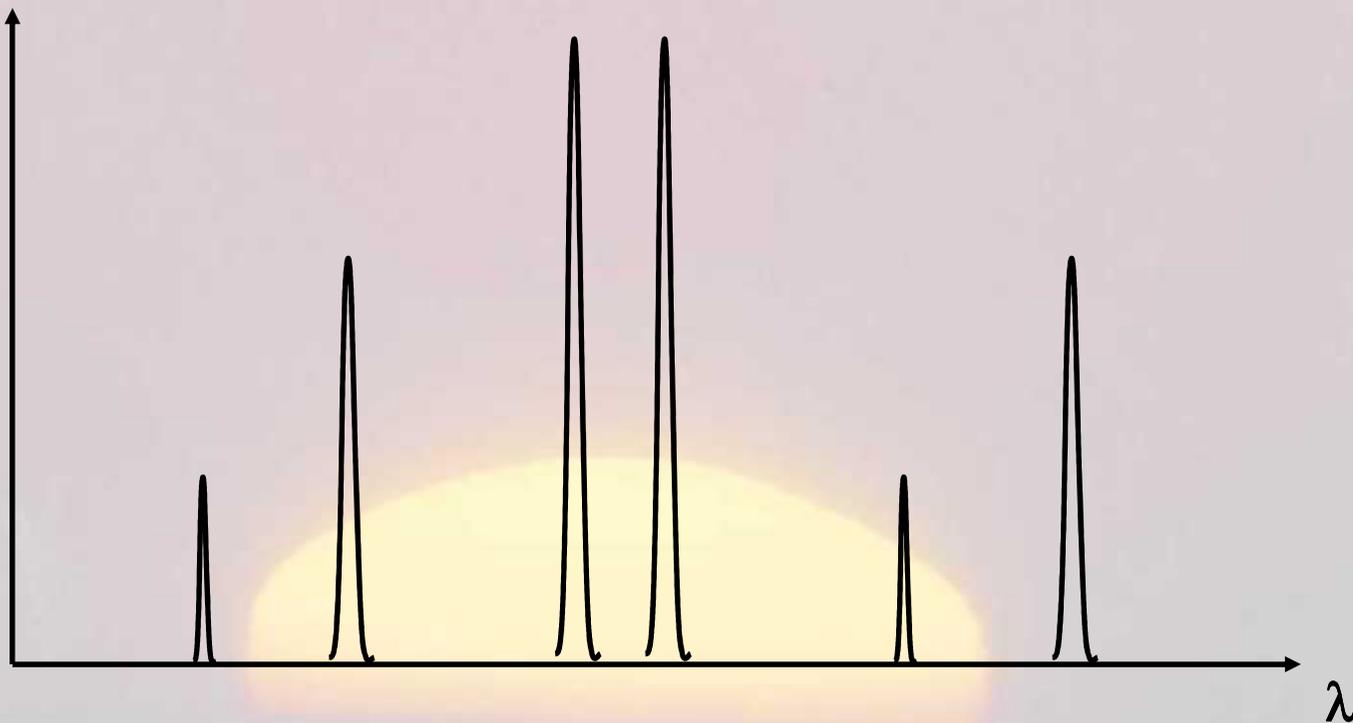
Niveau fondamental



Lycée *Clemenceau*

PCSI 1 - Physique

Intensité
lumineuse
émise

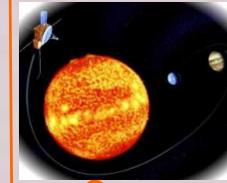


Les longueurs d'onde de ces raies sont caractéristiques des niveaux d'énergie des atomes présents, donc de la composition des sources spectrales.



Lycée *Clemenceau*

PCSI 1 - Physique



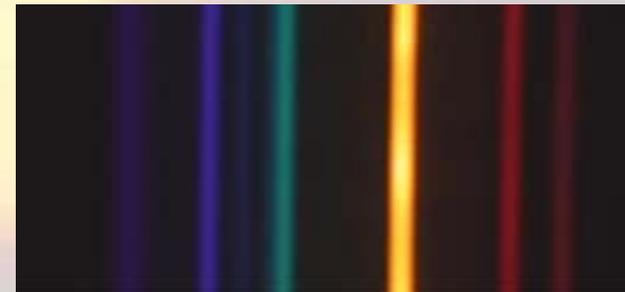
Exemples de spectres de raies :



Lampe à vapeur de néon



Lampe à vapeur de mercure

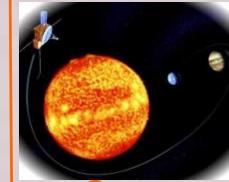


Lampe à vapeur d'hélium



Lycée *Clemenceau*

PCSI 1 - Physique



Le LASER : (Light Amplifier by Stimulated Emission of Radiation)

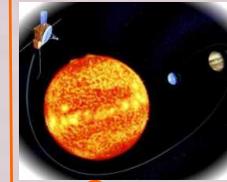
C'est une source de lumière monochromatique.

Le faisceau lumineux est très fin et directif.

Le laser le plus utilisé en TP est le laser **Hélium-Néon**, de couleur rouge ($\lambda = 632,8 \text{ nm}$).

Attention : ne jamais mettre son œil dans un faisceau laser !





4 - Approximation de l'optique géométrique, rayons lumineux :

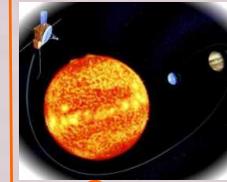
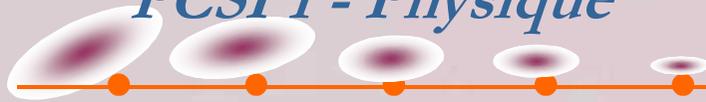
La formation des images par les systèmes optiques usuels peut être décrite par **une approche géométrique plus simple : l'optique géométrique.**

Il s'agit d'une approximation de la nature ondulatoire de la lumière lorsque les caractéristiques des milieux traversés varient peu à l'échelle de la longueur d'onde, c'est à dire si la condition :

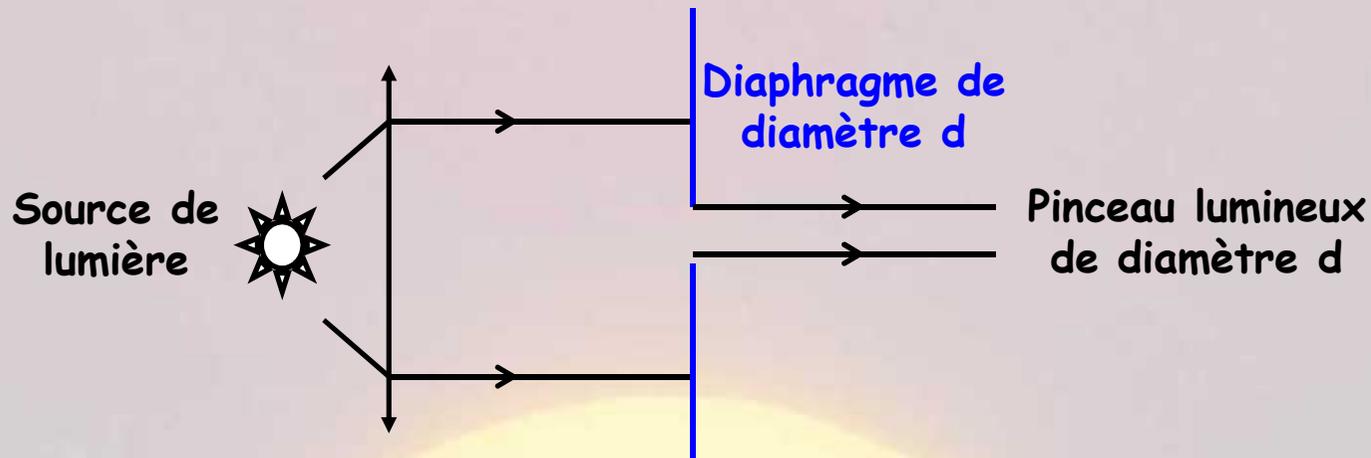
$$a \gg \lambda$$

est réalisée, où a est la distance caractéristique des variations spatiales de l'indice n .

Cette condition n'est pas difficile à satisfaire en optique puisque λ est de l'ordre d'une fraction de micromètre.



On considère un diaphragme de diamètre d , qui isole un pinceau lumineux de diamètre d :



Le rayon lumineux est la limite du pinceau lorsque d tend vers 0.

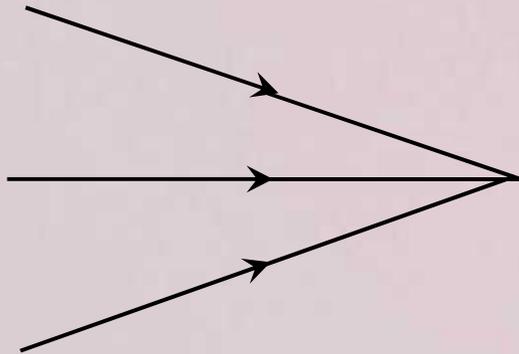
Pour visualiser ce qu'est un rayon lumineux, on peut (ou presque) utiliser un rayon laser.

Pour obtenir le cheminement d'un faisceau lumineux, on le décompose en rayons lumineux indépendants les uns des autres.

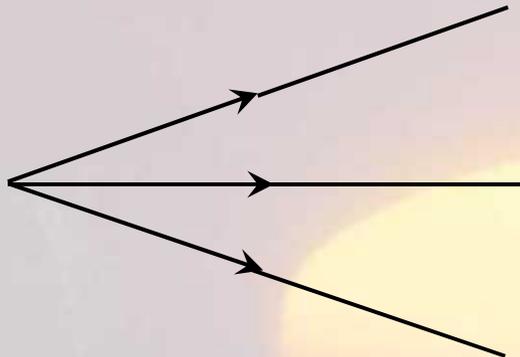


Lycée **Clemenceau**

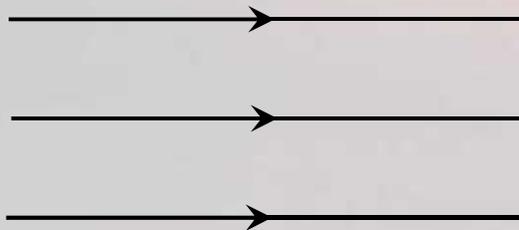
PCSI 1 - Physique



Faisceau convergent

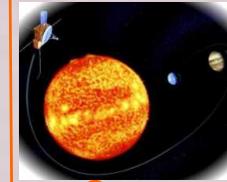
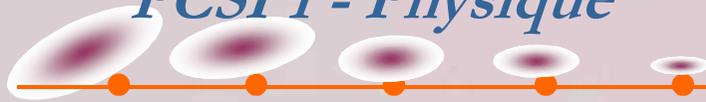


Faisceau divergent



Faisceau parallèle





5 - Propagation rectiligne de la lumière, principe de retour inverse :

* Milieu homogène : un milieu est « homogène » s'il a même composition en tous ses points.

* Un milieu est « isotrope » si ses propriétés sont les mêmes dans toutes les directions.

« Dans un milieu homogène et isotrope , la lumière se propage en ligne droite : les rayons lumineux sont des droites. »

Principe du retour inverse de la lumière :

« Le trajet suivi par la lumière entre deux points situés sur un même rayon lumineux est indépendant du sens de propagation de la lumière entre ces deux points. »



Lycée Clemenceau

PCSI 1 - Physique

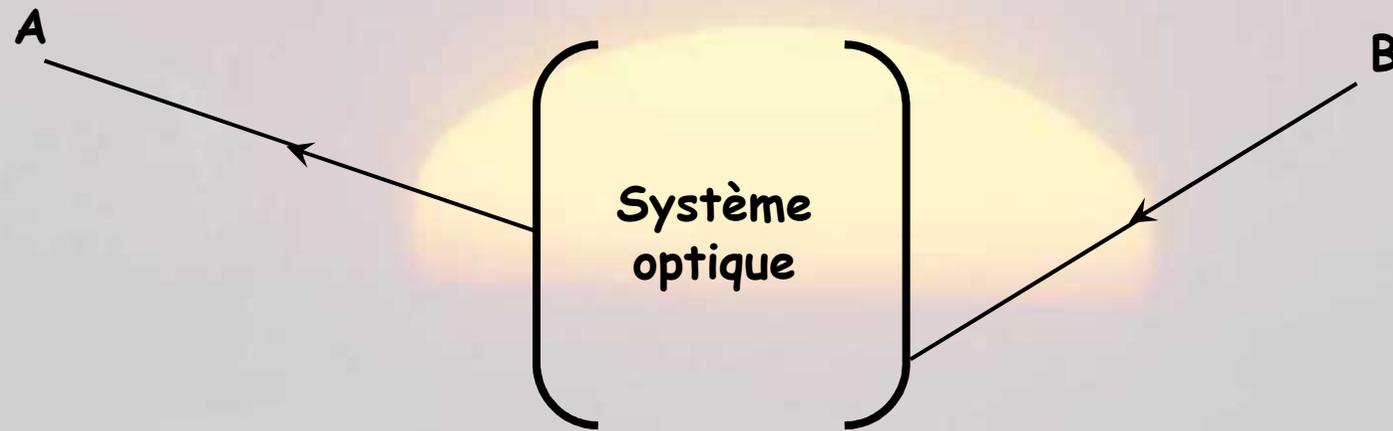
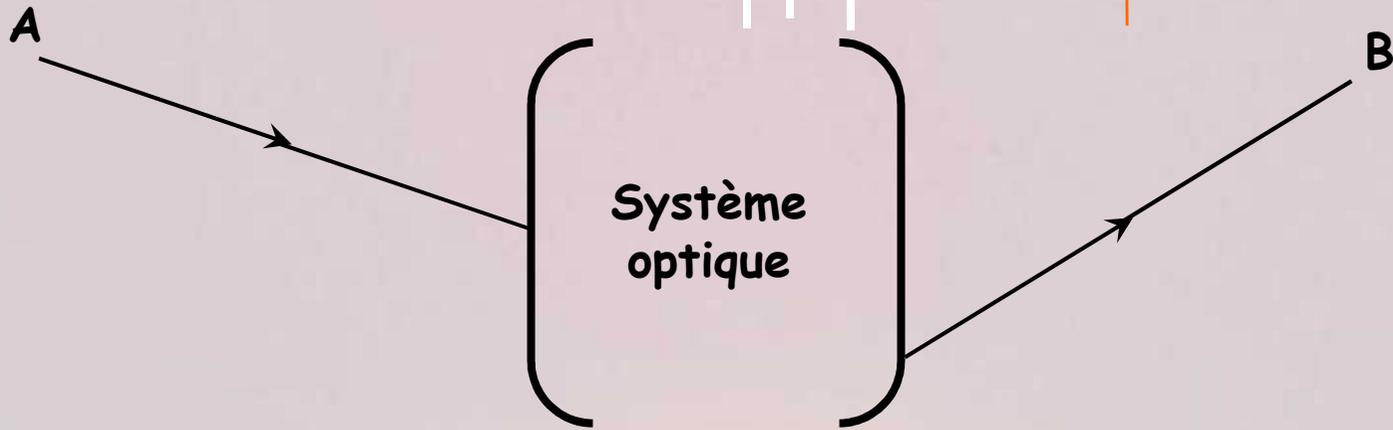
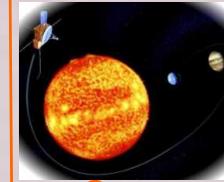


Illustration du principe du retour inverse de la lumière

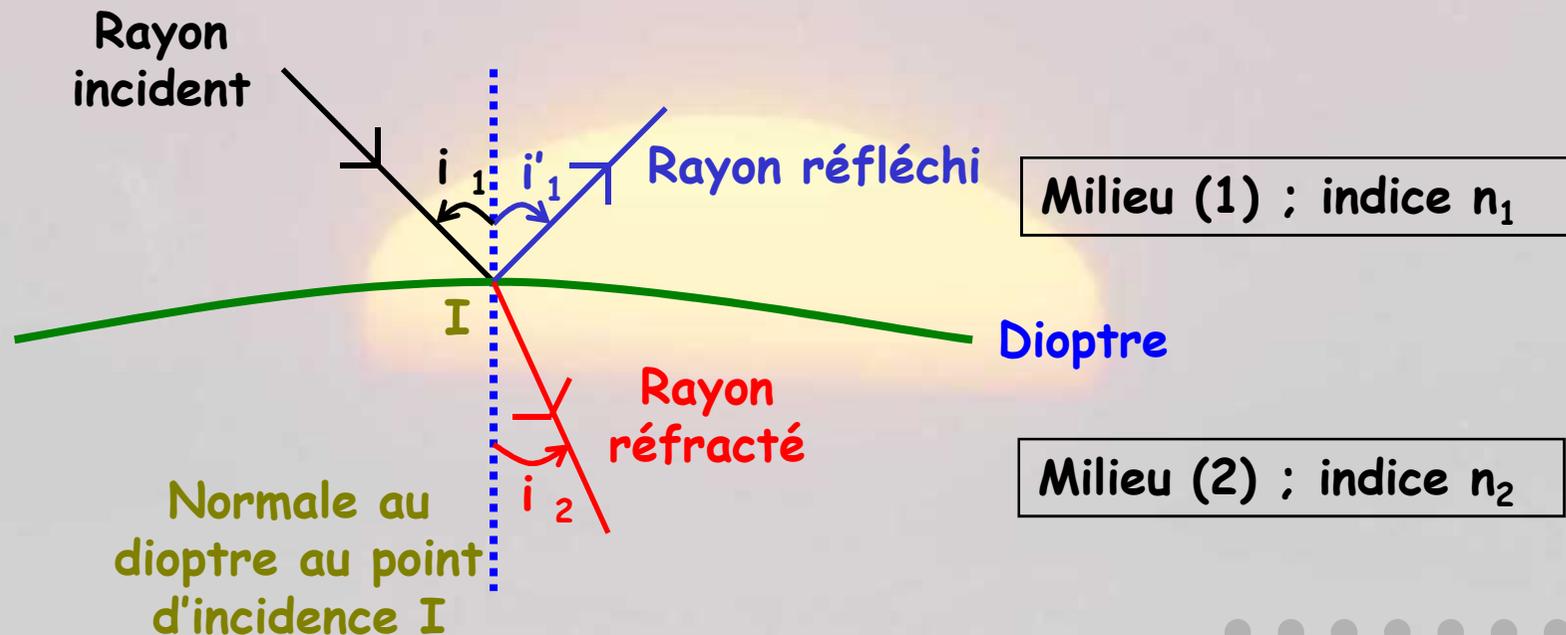


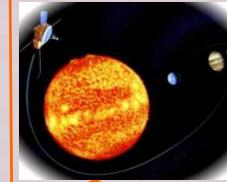


6 - Les lois de Snell-Descartes (réflexion et réfraction) :

On étudie le comportement des rayons lumineux à l'interface entre deux milieux (homogènes et isotropes) d'indices différents.

On appelle **dioptre** l'interface entre deux milieux.





Le **point d'incidence I** est l'intersection du rayon incident et du dioptre.

Le **plan d'incidence** est défini par la direction du rayon incident et la normale au dioptre au point d'incidence.

Lois de Snell-Descartes

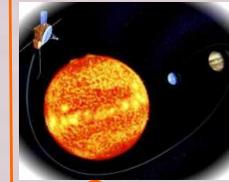
- Les rayons réfracté et réfléchi sont dans le plan d'incidence
- Angle de réflexion = angle d'incidence : $i_1 = i'_1$
- Pour le rayon réfracté : $n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$

Simulation Rousseau

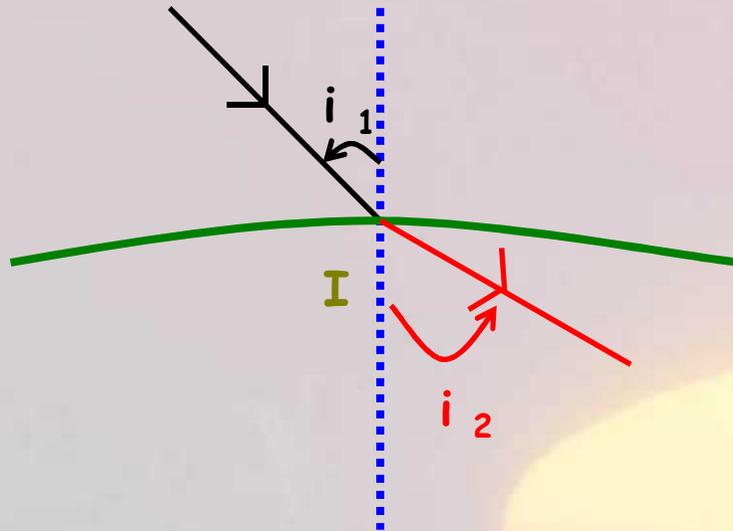


Lycée Clemenceau

PCSI 1 - Physique

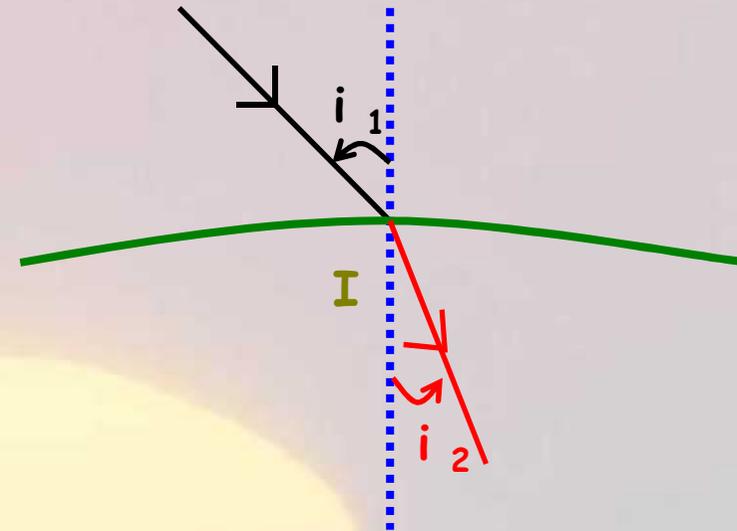


$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$$



$$n_2 < n_1$$

$$i_2 > i_1$$



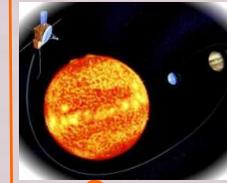
$$n_1 < n_2$$

$$i_1 > i_2$$

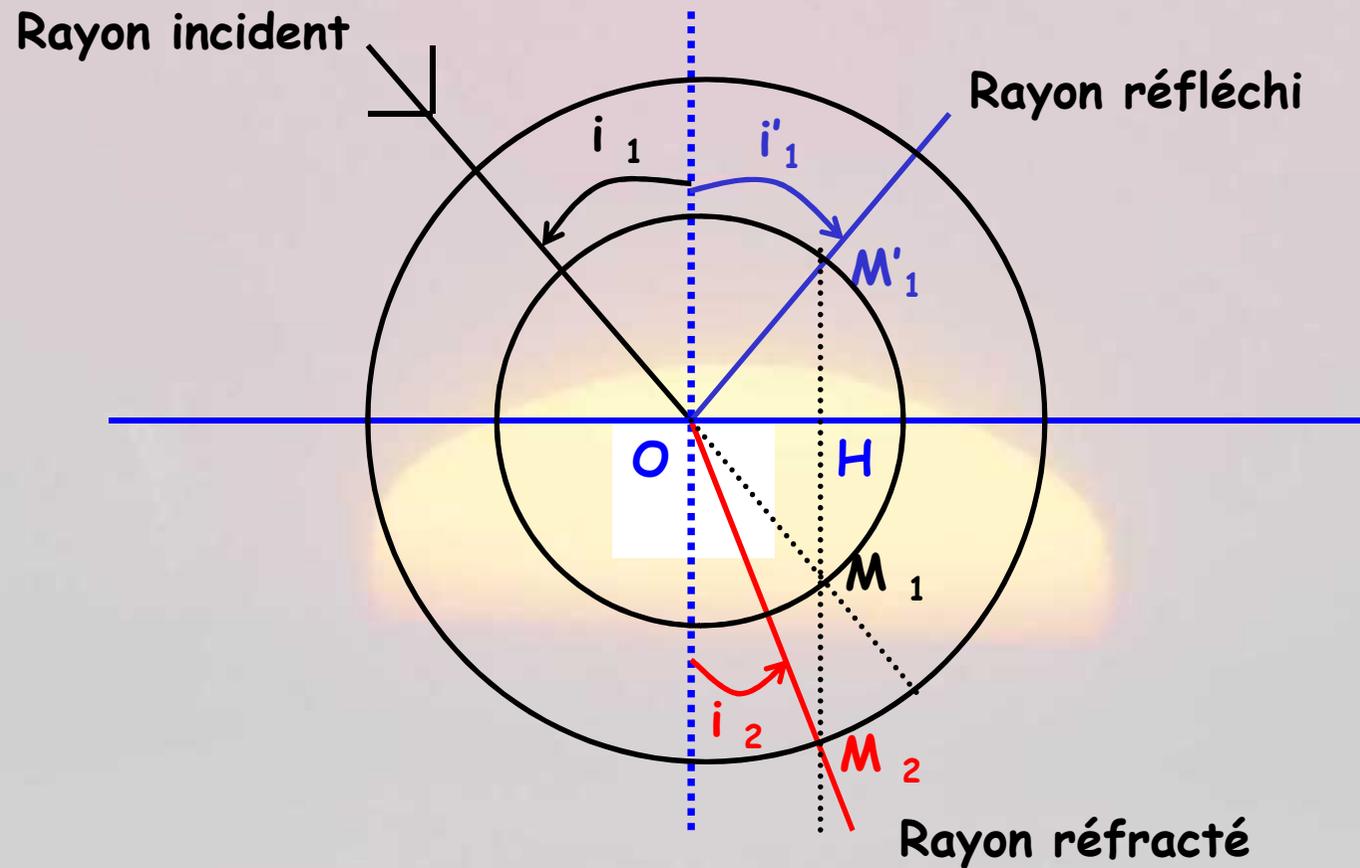


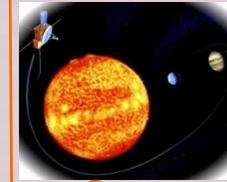
Lycée *Clemenceau*

PCSI 1 - Physique

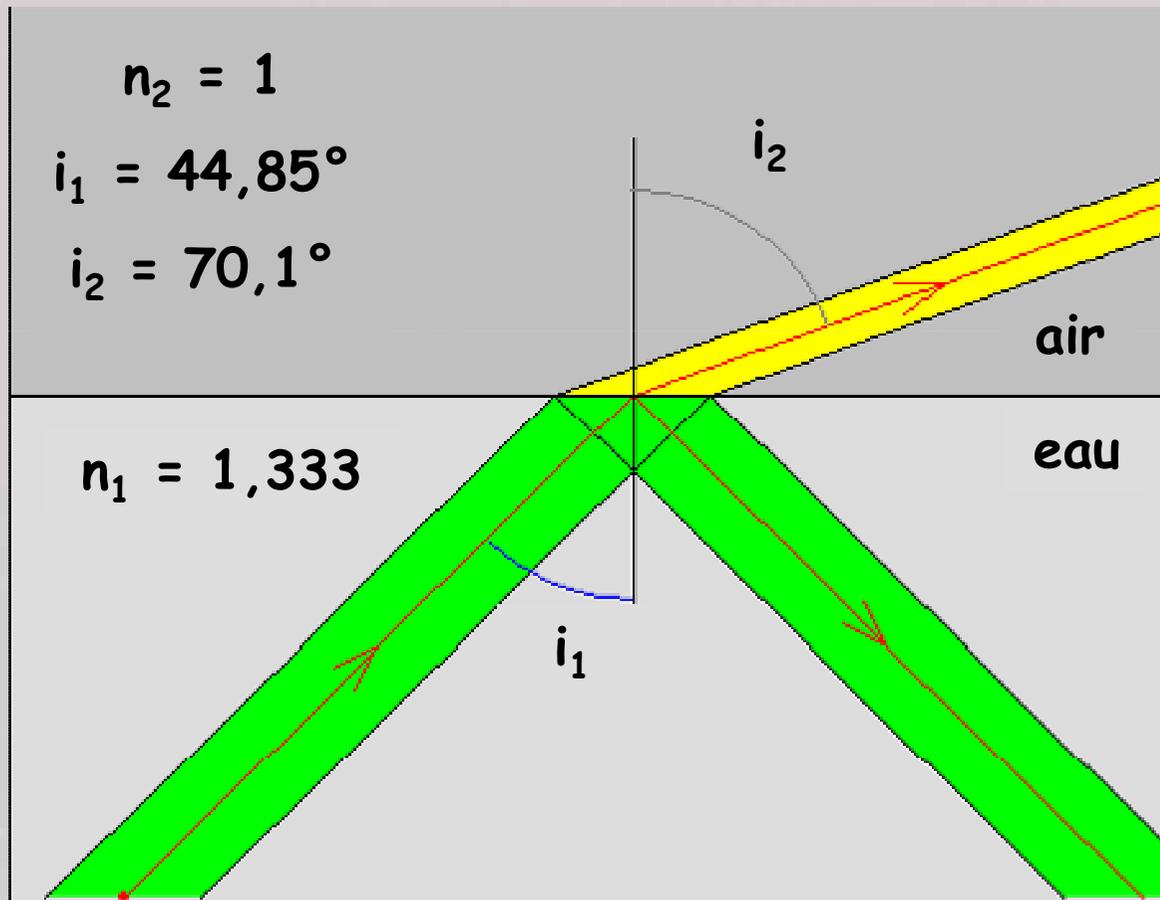


La construction géométrique de Descartes :





Le phénomène de réflexion totale : (pour $n_1 > n_2$)



Si $i_1 > i_L$: réflexion totale (i_2 n'existe pas)

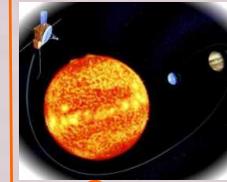
Simulation
Rousseau

$$\sin i_2 = \frac{n_1}{n_2} \sin i_1$$

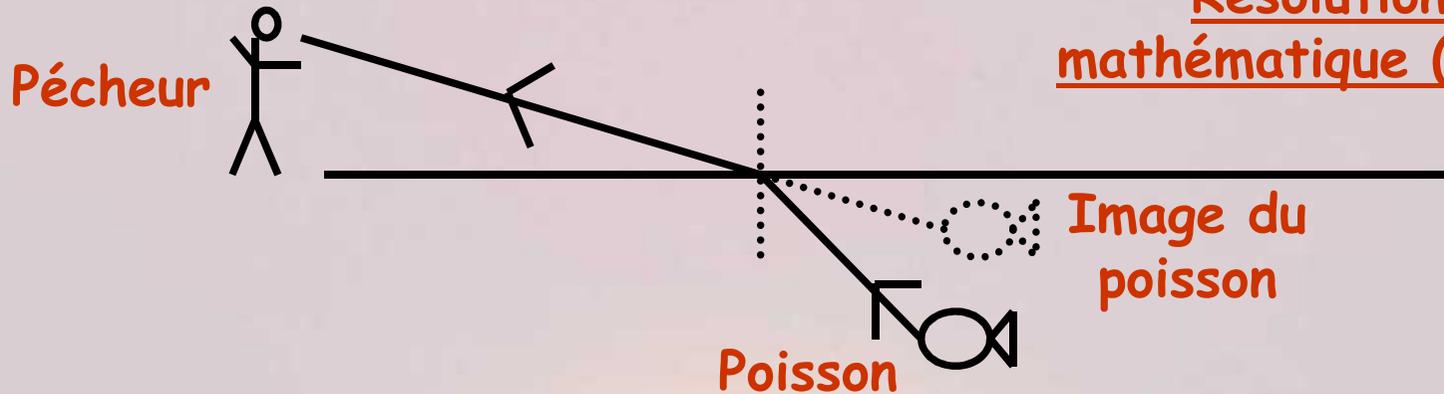
$\sin i_2 \leq 1$ implique :

$$i_1 \leq i_L \text{ avec :}$$

$$\sin i_L = \frac{n_2}{n_1}$$



Comment un pêcheur voit-il un poisson ?



Résolution
mathématique (html)

Un rayon issu du poisson est réfracté en sortant de l'eau et vient frapper les yeux du pêcheur avec un angle tel que le pêcheur voit le poisson plus haut qu'il n'est en réalité.

« Notons bien que lorsqu'un rayon rentre dans les yeux avec un angle donné, le cerveau interprète ceci comme voulant dire que ce que l'on observe est bien dans cette direction, habitué qu'il est depuis sa plus tendre enfance à ce que la lumière se propage en ligne droite. »

Pour des raisons similaires, un bâton à moitié plongé dans l'eau paraît cassé à l'interface entre l'air et l'eau.

Exercice n°4

a) Si l'on pose $OT' = h'$ et $OT = h$, on a $h' = h \frac{\tan r}{\tan i}$.
Par ailleurs, la relation entre i et r est donnée par la loi de Snell-Descartes $\sin i = n \sin r$. On a finalement

$$h' = h \frac{\cos i}{\sqrt{n^2 - \sin^2 i}}$$

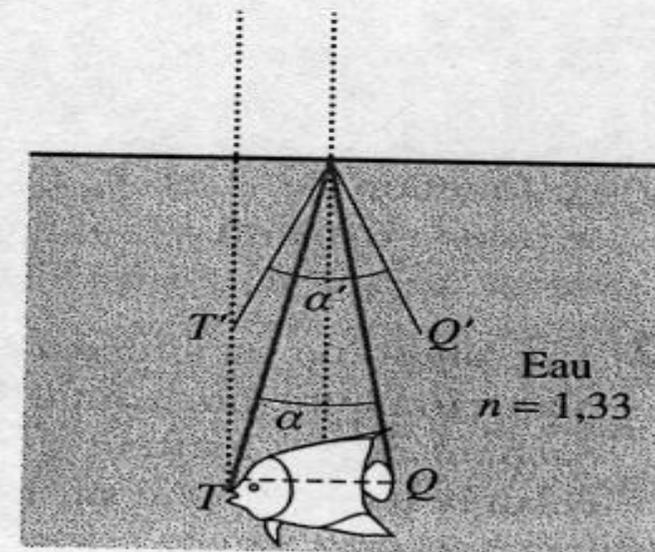
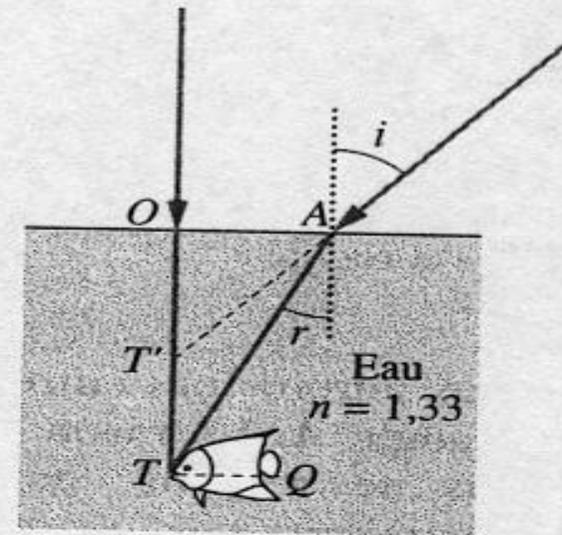
Si $i = 10^\circ$, $h' = 0,747$ m.

Si $i = 30^\circ$, $h' = 0,702$ m.

La position de l'image du poisson s'est légèrement déplacée d'un cas à l'autre. Ainsi, elle dépend de l'angle d'incidence. On voit net parce que l'œil intercepte des rayons provenant d'angles i proches les uns des autres. Si la pupille de l'œil était très grande, on verrait flou. L'image du poisson sera plus nette dans le premier cas que dans le deuxième. Ceci est dû au fait que l'on s'éloigne de plus en plus de la condition de validité de l'approximation de Gauss.

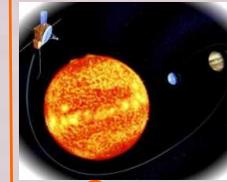
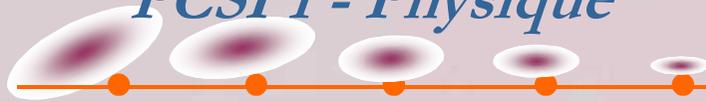
b) Dans le cadre de l'approximation de Gauss, i est très petit, ce qui entraîne $i \approx nr$. On a alors $h' \approx h/n$. Si le poisson est à 1 m de profondeur, $h' = 0,752$ m. S'il est à 4 m de profondeur, $h' = 3$ m.

c) L'angle α est donné par la relation $\tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{TQ}{2h}$. Avec $TQ = 1$ m et $h = 1$ m, $\alpha = 53,13^\circ$. Cet angle correspond à l'angle du rayon non réfracté par l'eau. L'angle α' est l'angle apparent avec lequel on voit le poisson. Il est donné par la relation de Snell Descartes : $\sin \frac{\alpha'}{2} = n \sin \frac{\alpha}{2}$, soit $\alpha' = 73^\circ$.



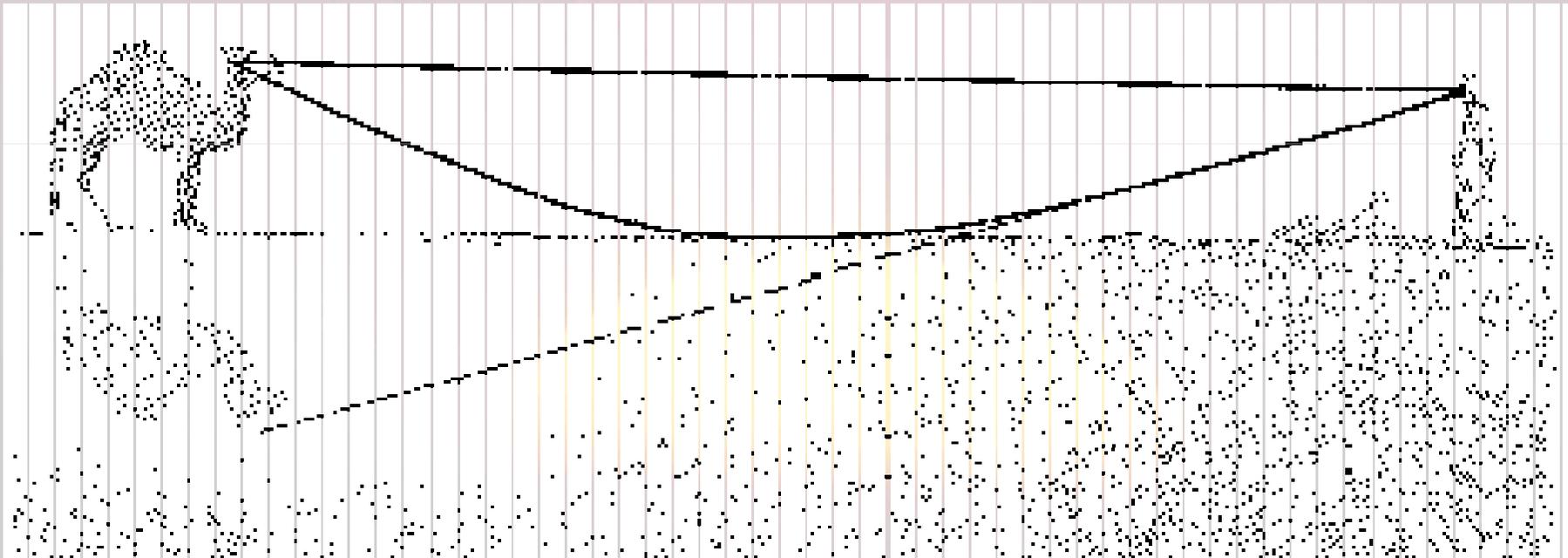
Lycée *Clemenceau*

PCSI 1 - Physique



7 - Le principe des mirages :

Un mirage dans le désert !



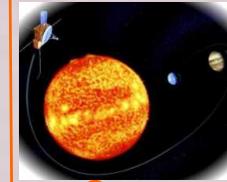
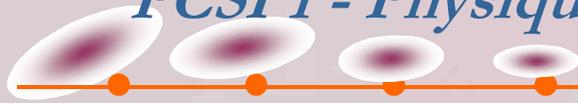
Simulation Cabri :

mirages inférieurs

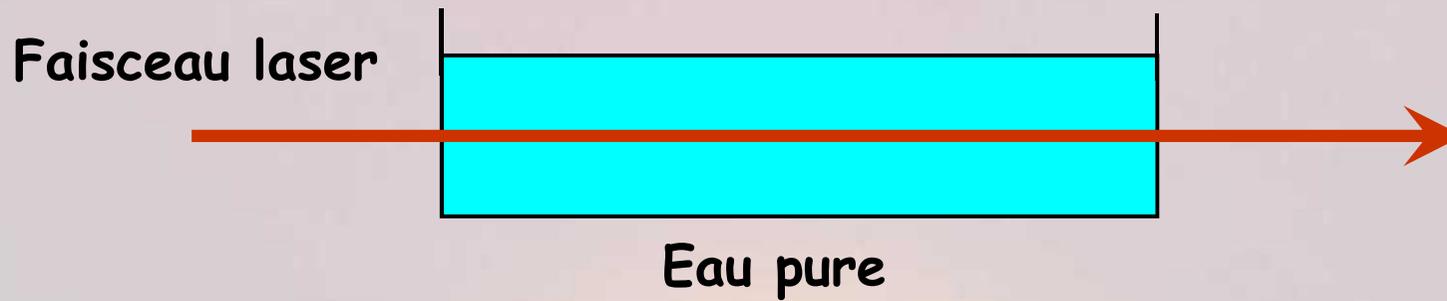
mirages supérieurs

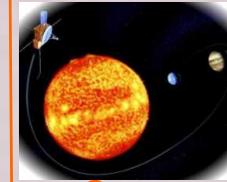
Lycée *Clemenceau*

PCSI 1 - Physique



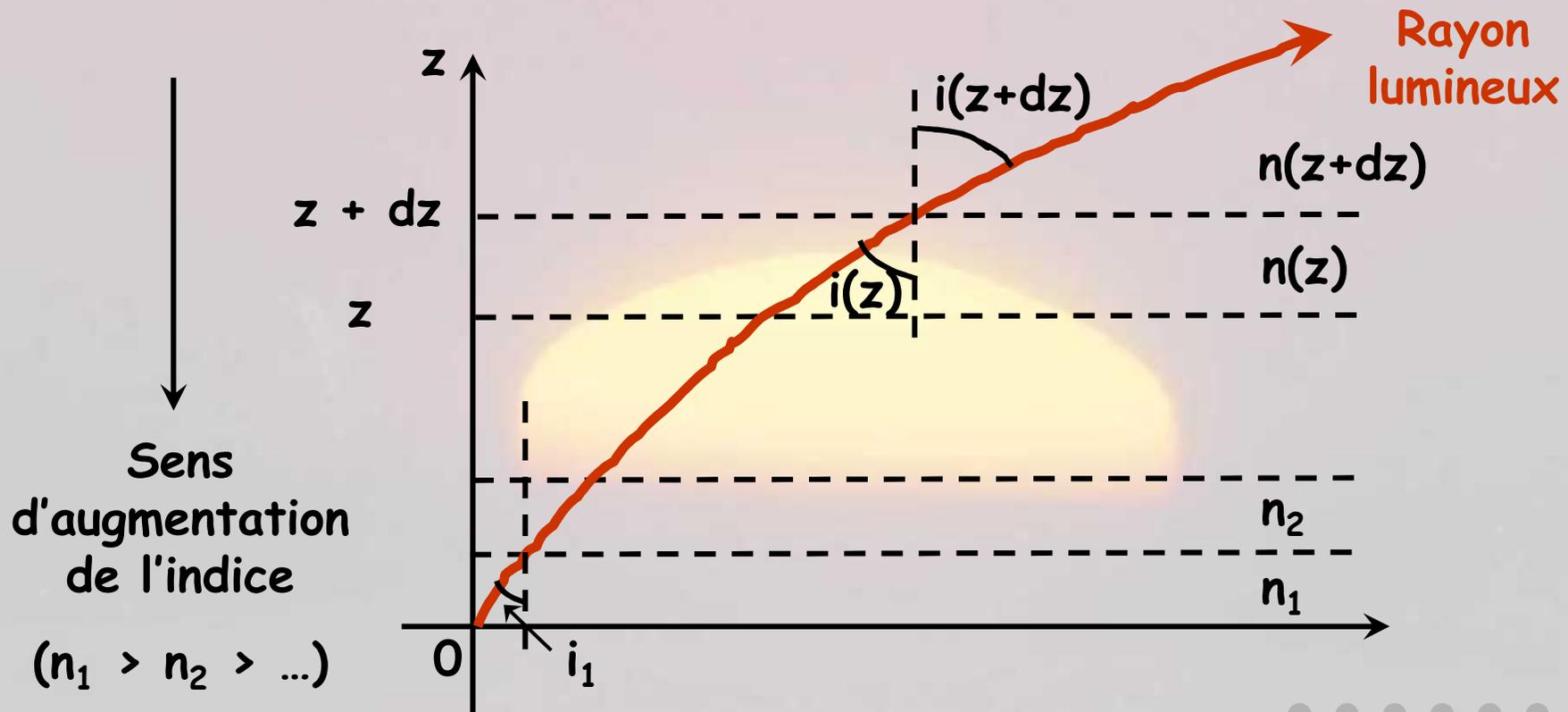
Expérience de la cuve à eau sucrée :

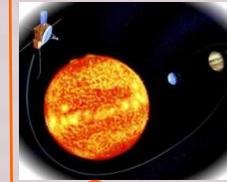
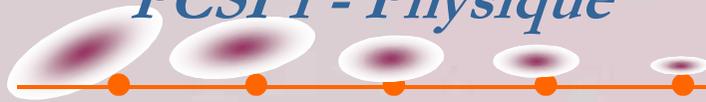




Lois de Descartes dans un milieu d'indice variable :

Le milieu (non homogène) est supposé stratifié (succession de couches planes d'épaisseurs dz homogènes, d'indice $n(z)$).

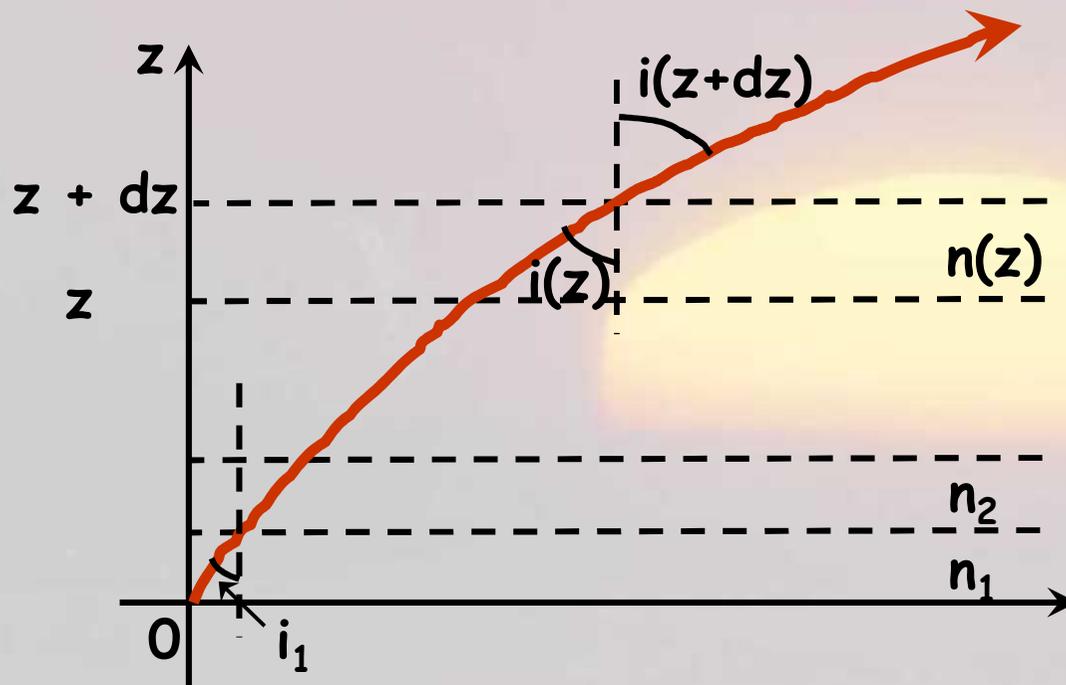




Dans chaque couche, la lumière se propage de manière rectiligne.

La loi de la réfraction donne :

$$n_1 \sin i_1 = \dots = n(z) \sin i(z) = n(z + dz) \sin i(z + dz)$$



$$n(z) \sin i(z) = cste$$

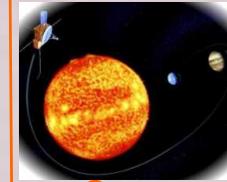
(Invariant lors de la propagation du rayon)

Comme $n_1 > n_2 > \dots$, $i_1 < i_2 < \dots$:

Le rayon oblique peu à peu vers les zones d'indice plus élevé (la concavité du rayon est vers le bas)

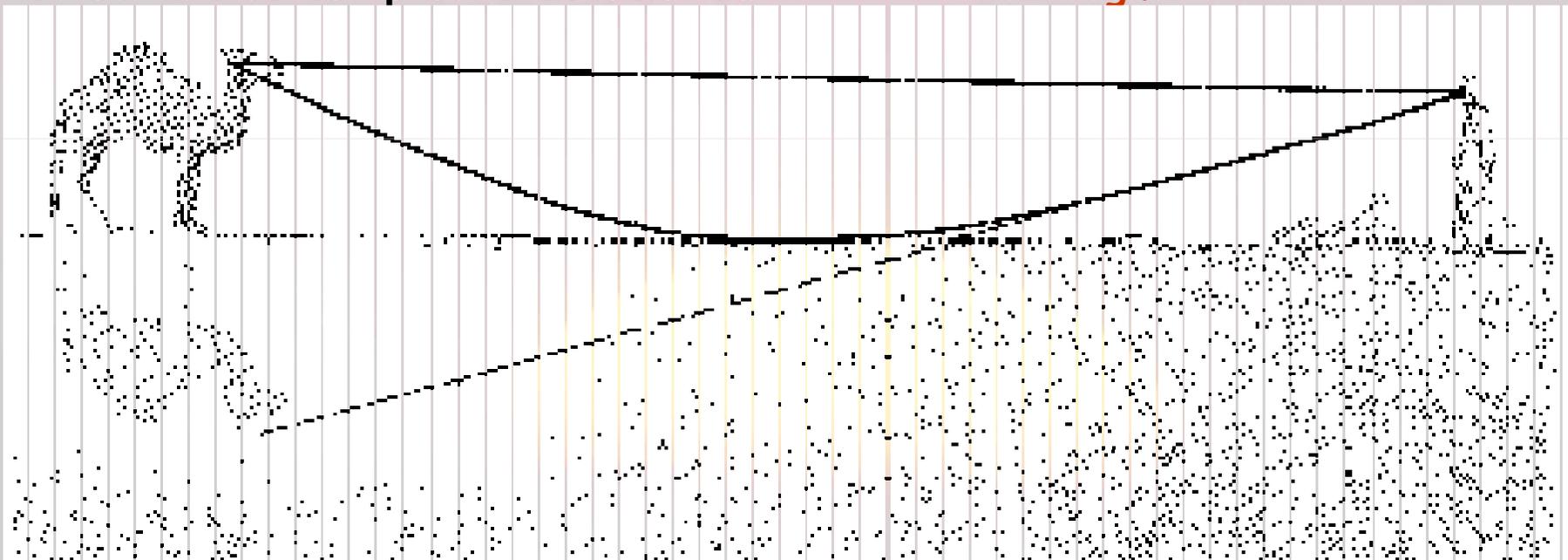
Lycée *Clemenceau*

PCSI 1 - Physique



Mirages inférieurs (un mirage dans le désert ou sur une route) :

En été, le sol est plus chaud que l'air. L'air au niveau du sol est « dilué » et son indice est proche de celui du vide : **l'indice augmente avec l'altitude.**



Simulation Cabri : mirages inférieurs



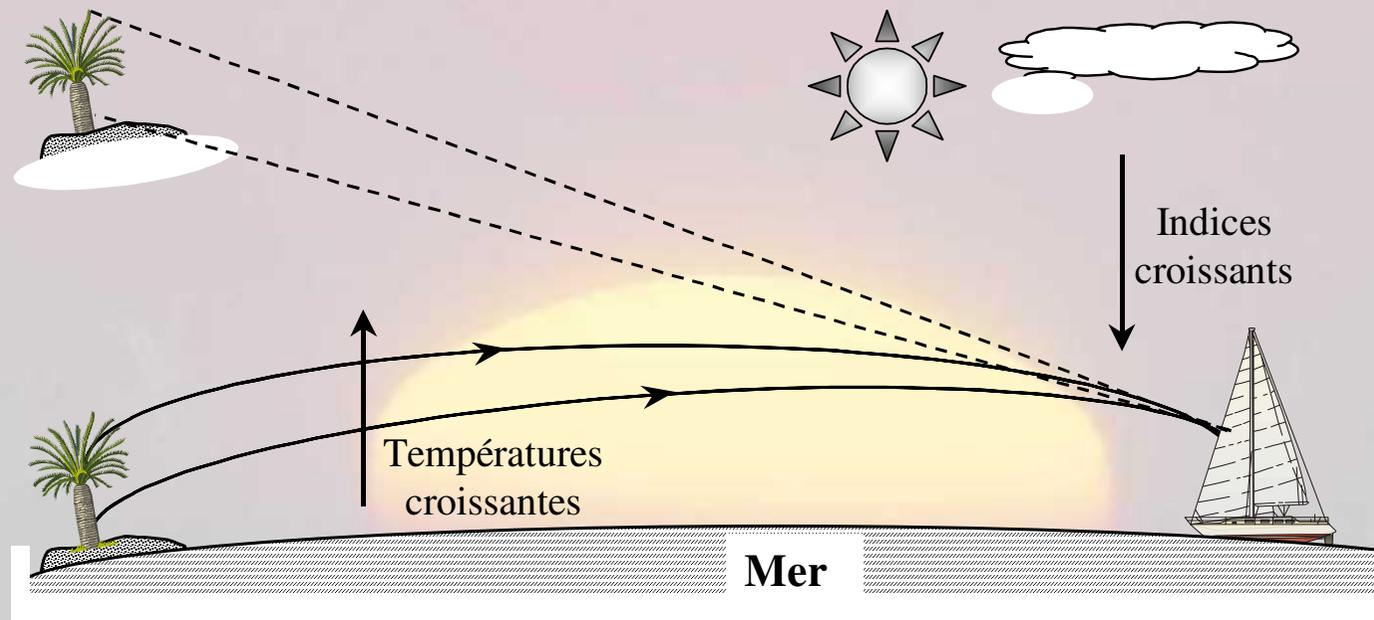
Lycée *Clemenceau*

PCSI 1 - Physique



Mirages supérieurs (un mirage sur l'océan) :

En été, la mer est plus « froide » que l'air : **l'indice diminue avec l'altitude.**

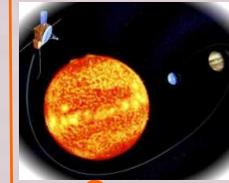
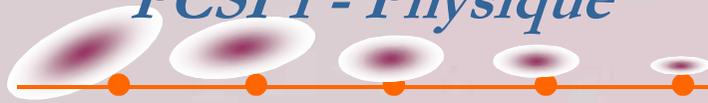


Simulation Cabri : mirages supérieurs



Lycée *Clemenceau*

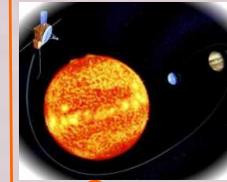
PCSI 1 - Physique



Forme du Soleil couchant :

La photo suivante fait apparaître le soleil couchant comme un disque aplati.





Ce phénomène s'explique encore par la réfraction de la lumière solaire à travers l'atmosphère.

En effet, plus la couche atmosphérique traversée est grande et plus les rayons solaires sont incurvés. Par conséquent, le bord inférieur du Soleil sera plus relevé que le bord supérieur, transformant le disque circulaire du Soleil en un disque aplati. Le diamètre apparent du Soleil (angle défini comme le rapport du diamètre du Soleil sur la distance Terre-Soleil et exprimé en minutes d'angle) voit sa valeur passer de 32' à 26'. On peut enfin remarquer que l'observateur terrestre voit encore le Soleil alors que celui est déjà couché et situé derrière l'horizon ; il s'agit ici d'un exemple de mirage « supérieur »

