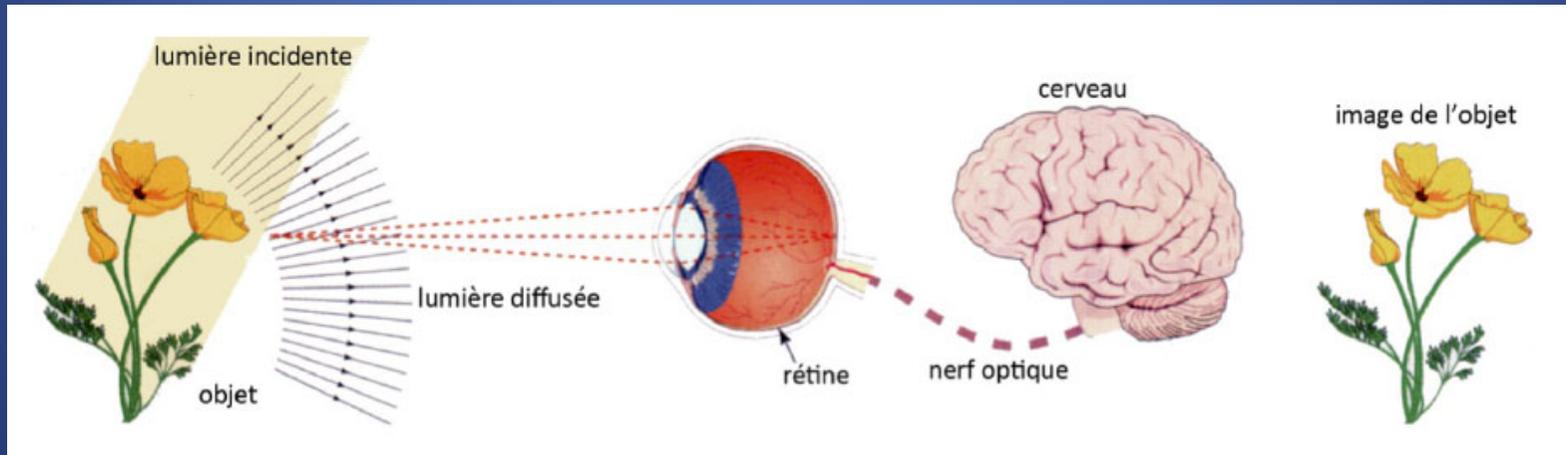


Chapitre 1 : principes et lois fondamentales de l'optique géométrique

1 Cadre et outil de l'optique géométrique

1.1 Définition

L'*optique* est la *partie de la physique* qui traite de la *lumière*, de son comportement, de sa propagation et de ses propriétés ; l'optique étudie les lois régissant les *phénomènes lumineux* et en particulier la *vision*.



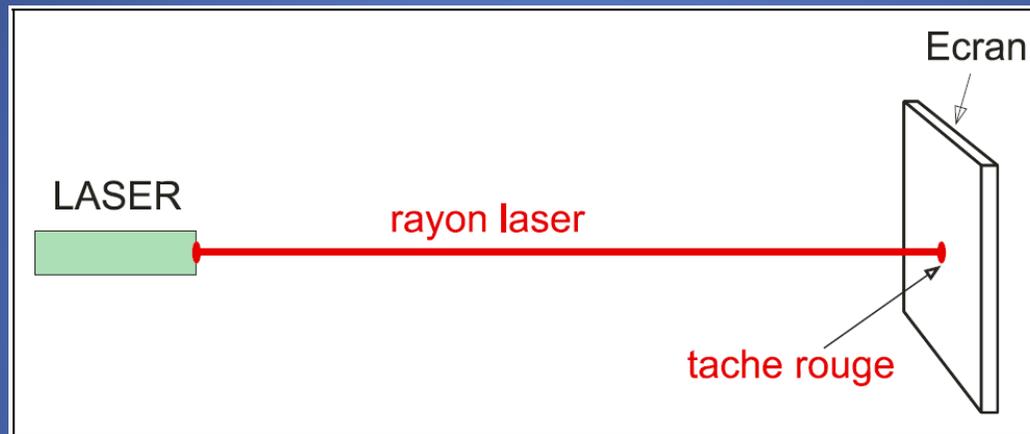
« La lumière est l'agent qui nous permet de voir »

L'*optique géométrique*, par opposition à l'*optique physique*, s'intéresse aux phénomènes où la nature fondamentale de la lumière ne joue pas de rôle.

1.2 Visibilité de la lumière et des objets

Expérience :

Dans un premier temps, dans l'obscurité, *visons un écran* blanc avec un *laser*.



Observation

Nous apercevons *une tache rouge sur l'écran*. Le faisceau laser est pratiquement invisible sur son parcours, *seul le point de sortie du laser et le point d'impact sont visibles*.

« La lumière ne se voit pas lors de sa propagation »

Dans de nombreuses situations de la vie quotidienne aussi, la présence d'impuretés ou de particules en suspension dans l'air permet de « *matérialiser* » *le parcours de la lumière*.



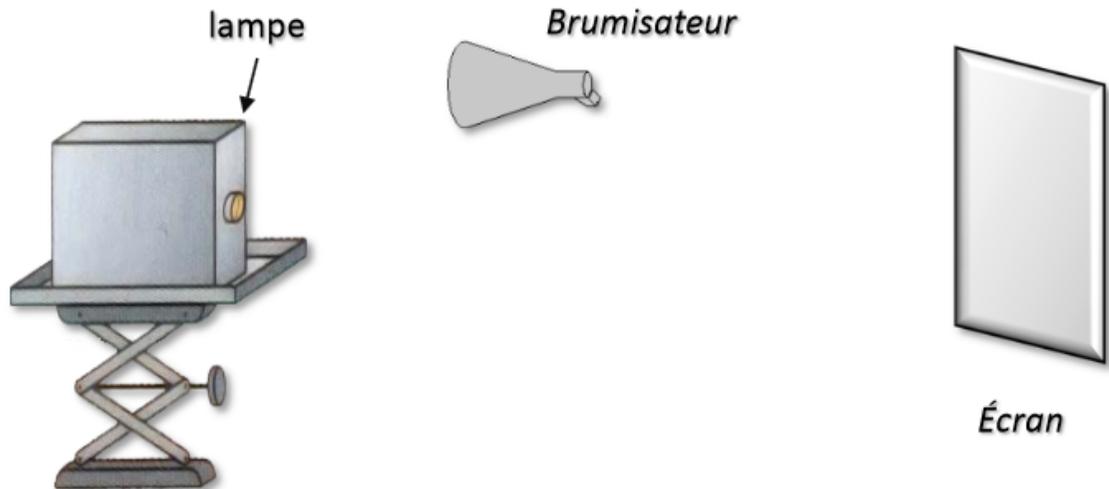
« *Rayons* » de soleil passant à travers les nuages

Visualisation d'un faisceau de lumière

Tu disposes d'une source de lumière, d'un brumisateur et d'un écran.

Éclaire l'écran opaque avec la source de lumière.

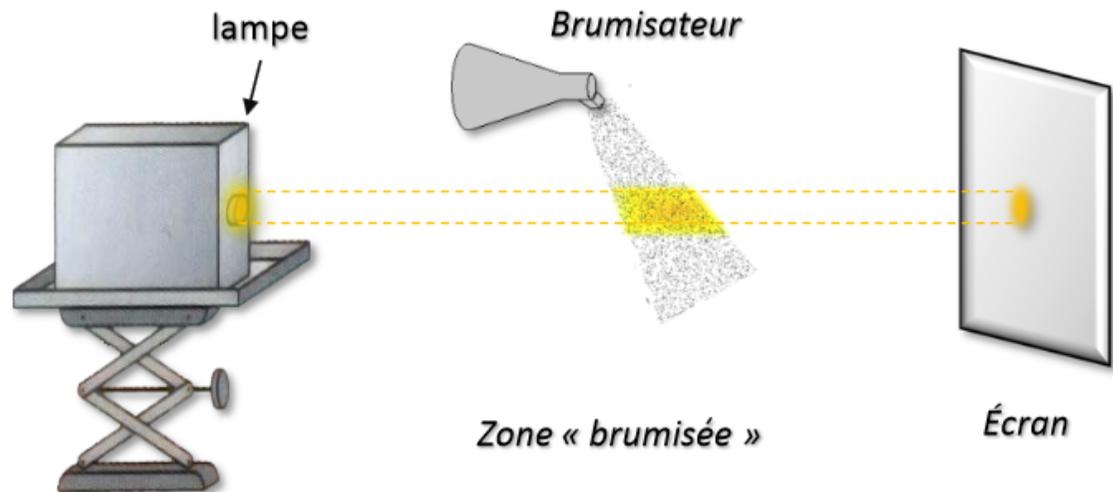
Crée un brouillard avec le brumisateur entre la source de lumière et l'écran.



Visualisation d'un faisceau de lumière

2. Qu' observes-tu ?

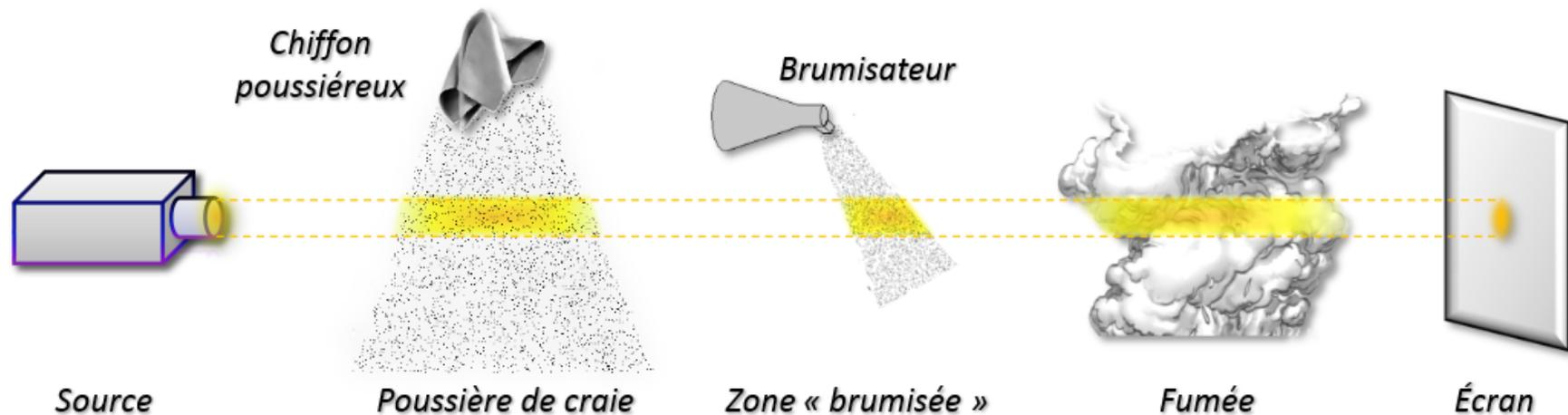
Sans brouillard, on ne voit pas le trajet de la lumière de la lampe vers l'écran. On ne voit le trajet de la lumière que lorsque celle-ci traverse le brouillard, formé de gouttelettes d'eau.



Visualisation d'un faisceau de lumière

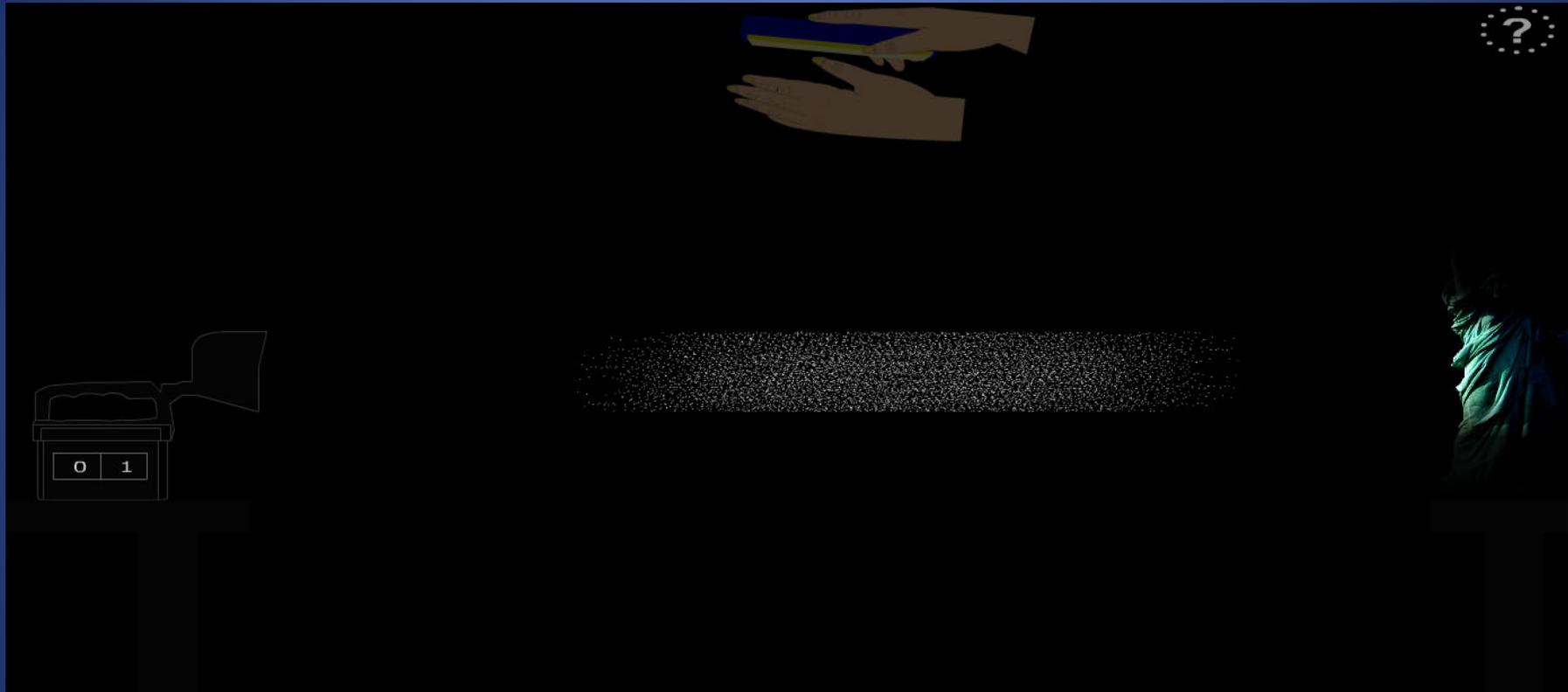
2. Quel autre moyen peut-on utiliser pour visualiser le faisceau de lumière ?

On peut utiliser de la poussière de craie, de la fumée, de la farine, un brumisateur... pour visualiser le faisceau de lumière.



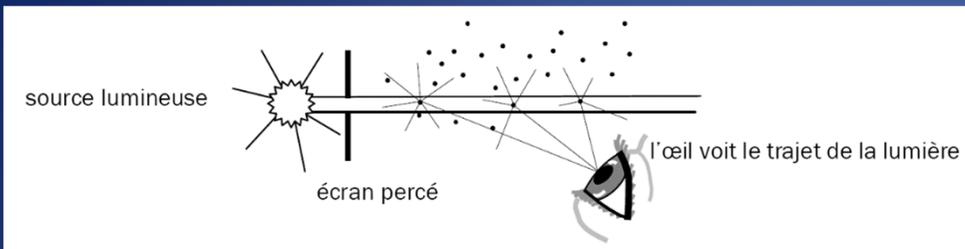
Expérience

Saupoudrons de la *poussière de craie* ou pulvérisons des *gouttelettes d'eau* entre la source et l'écran.



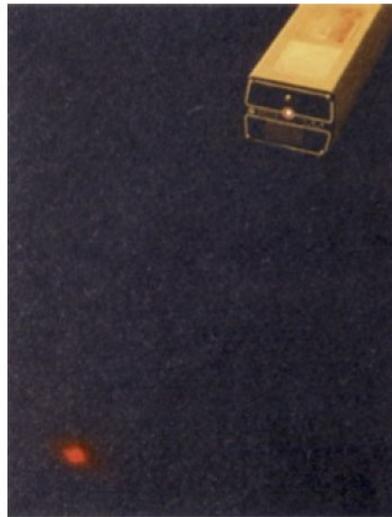
[Fichier en local](#)

[http://physiquecollege.free.fr/physique chimie college lycee/cinquieme/optique/propagation_lumiere.htm](http://physiquecollege.free.fr/physique_chimie_college_lycee/cinquieme/optique/propagation_lumiere.htm)



Observation

Les poussières de craie permettent de *bien voir le faisceau lumineux*, tout au long du trajet.



(a) dans l'air



(b) à travers la vapeur

Interprétations

Le faisceau lumineux n'est visible que si des *particules* disséminées dans le faisceau *diffusent* vers notre œil une partie de la lumière du laser.

« La lumière ne se voit pas , elle fait voir »

Expérience

Plaçons enfin un *carton opaque* devant nos yeux et reprenons les expériences précédentes avec le laser.

Observation

Ni le faisceau ni la tache rouge ne sont visibles.

Interprétation

Un *corps opaque* placé devant les yeux *empêche la lumière de pénétrer dans les yeux*.

– Certains matériaux, comme le verre ou l'air, laissent passer la lumière : ce sont des **matériaux transparents**.

– D'autres matériaux, comme le carton, ne laissent pas passer la lumière : ce sont des **matériaux opaques**.

– D'autres matériaux, comme le miroir, réfléchissent la lumière : ce sont des **matériaux réfléchissants**.



Matériaux transparents

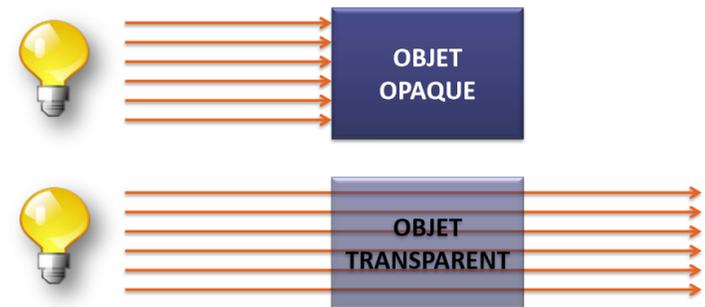


Matériaux opaques



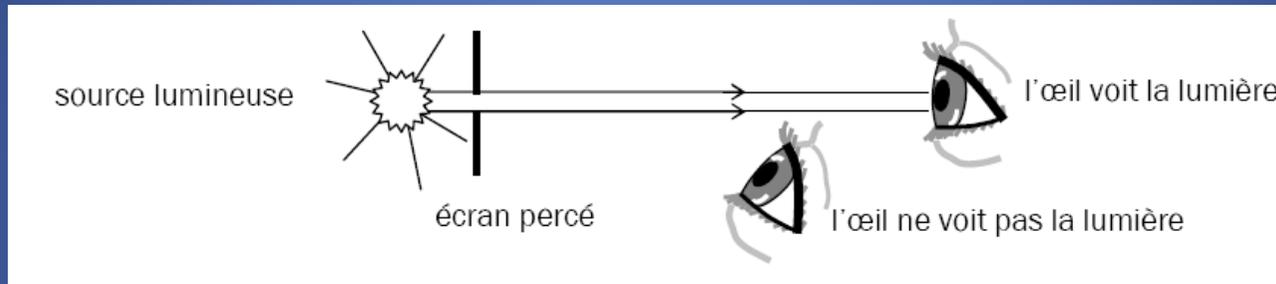
Matériaux réfléchissants

La lumière peut traverser un objet **transparent** mais pas un objet **opaque**.



Conclusions

- ✓ *Nous ne voyons pas la lumière du faisceau lorsqu'il se propage.* Notre œil reçoit une partie de la *lumière diffusée* par les particules qui s'y trouvent, ce qui nous le rend perceptible.
- ✓ *Pour être vu* d'un observateur, *un objet doit être lumineux* et *la lumière qu'il reçoit et diffuse doit parvenir jusqu'à l'œil* de l'observateur.



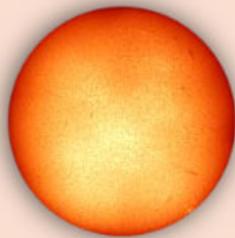
La lumière est **invisible** dans un milieu **transparent** comme l'air.

Lorsqu'il y a un brouillard (réalisé ici avec un brumisateuse), chaque gouttelette d'eau agit comme une source **secondaire** de lumière (ou un **objet diffusant**) qui reçoit la lumière de la source primaire de lumière et la **diffuse** : on peut ainsi visualiser le **faisceau** de lumière.

Types de sources de lumière

- Il existe deux types de sources de lumière :
 - Les **sources primaires** qui produisent leur propre lumière ;
 - Les **objets diffusants** qui doivent être éclairés pour être vus.

Sources primaires



Soleil



Flamme
de bougie



Ampoule

Sources secondaire ou objets diffusants



Planète



Arbres



Livres

Les sources de lumière sont très variées. Il y a deux grandes catégories de sources : primaires et secondaires.

- Les sources primaires correspondent aux objets qui produisent de la lumière. Ainsi le soleil par fusion thermonucléaire, les ampoules par échauffement électrique, les lasers, les radiateurs par rayonnement thermique, ...).
- Les sources secondaires correspondent aux objets qui réfléchissent la lumière qui vient d'une source extérieure (le soleil éclaire la lune, ...).

- Sources primaires et sources secondaires ?



Doc. 1 : Éclairage d'un arbre



Doc. 2 : Feu de camp



Doc. 3 : Lampe à incandescence



Doc. 5 : Ciel nocturne étoilé



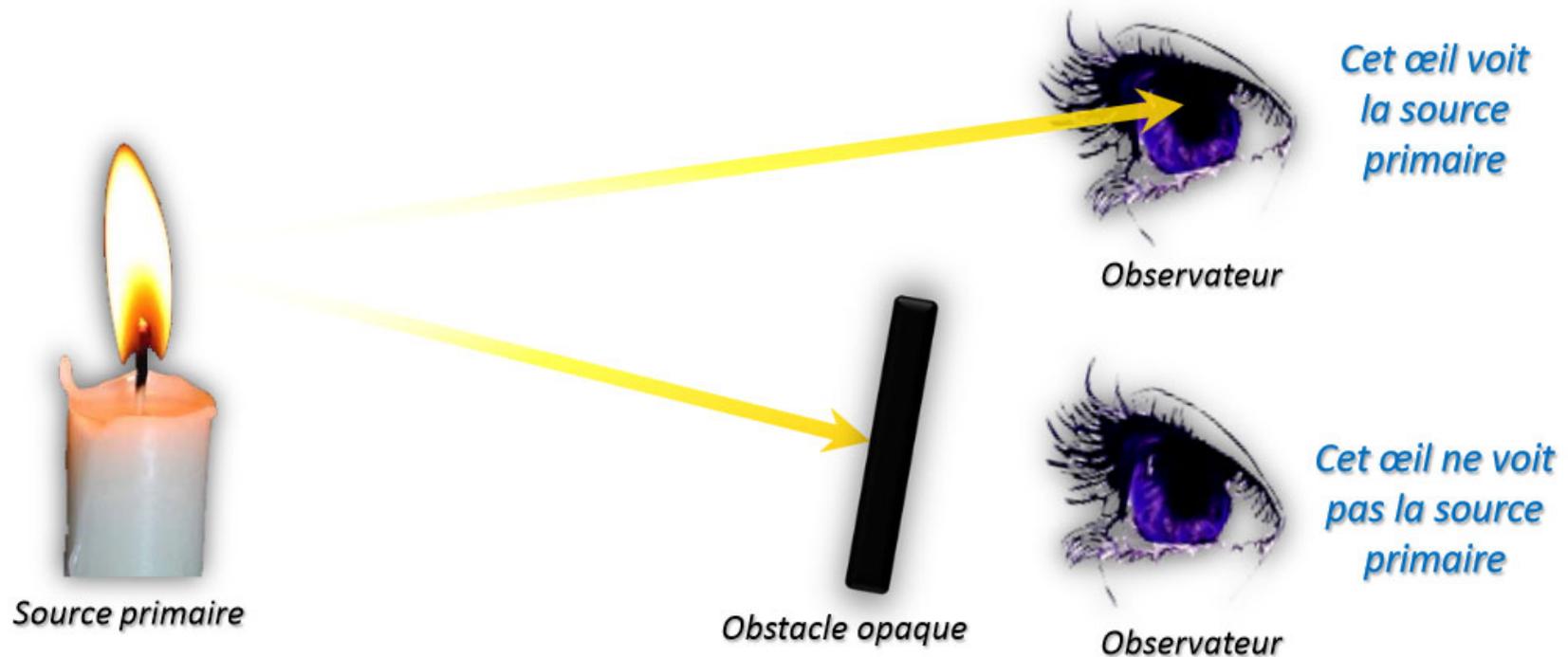
Doc. 4 : Coulée de lave



Doc. 6 : Scène de spectacle

Condition de visibilité

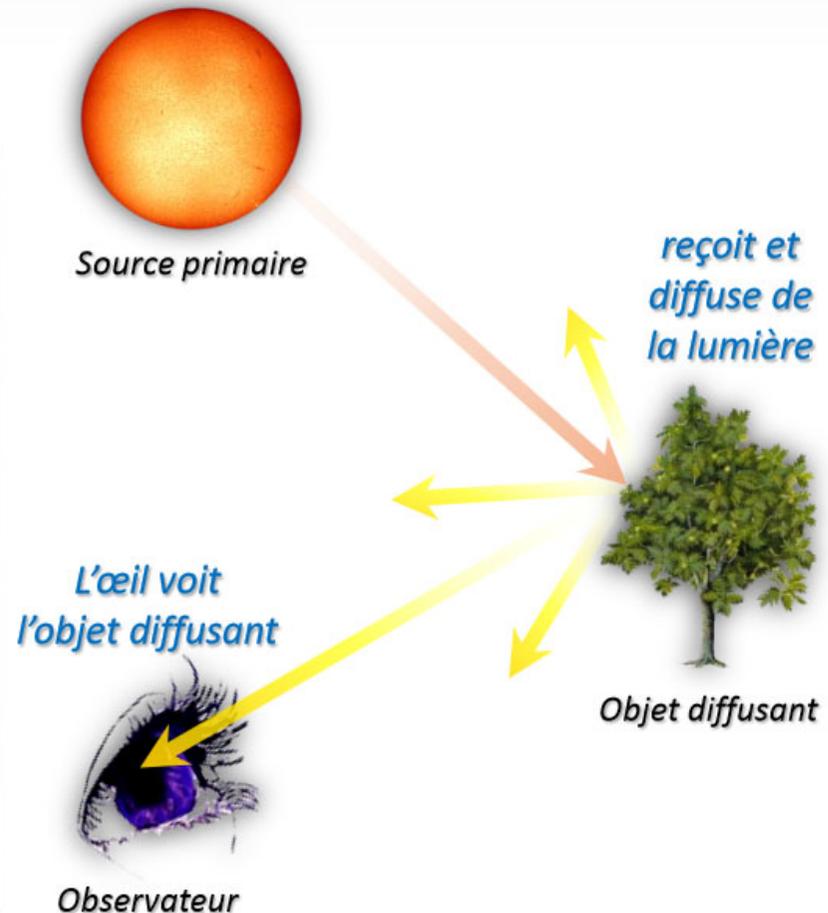
- Pour voir une source primaire, l'œil de l'observateur doit recevoir de la lumière, issue de cette source.



« Voir » signifie « recevoir de la lumière dans les yeux » !

- Condition de visibilité

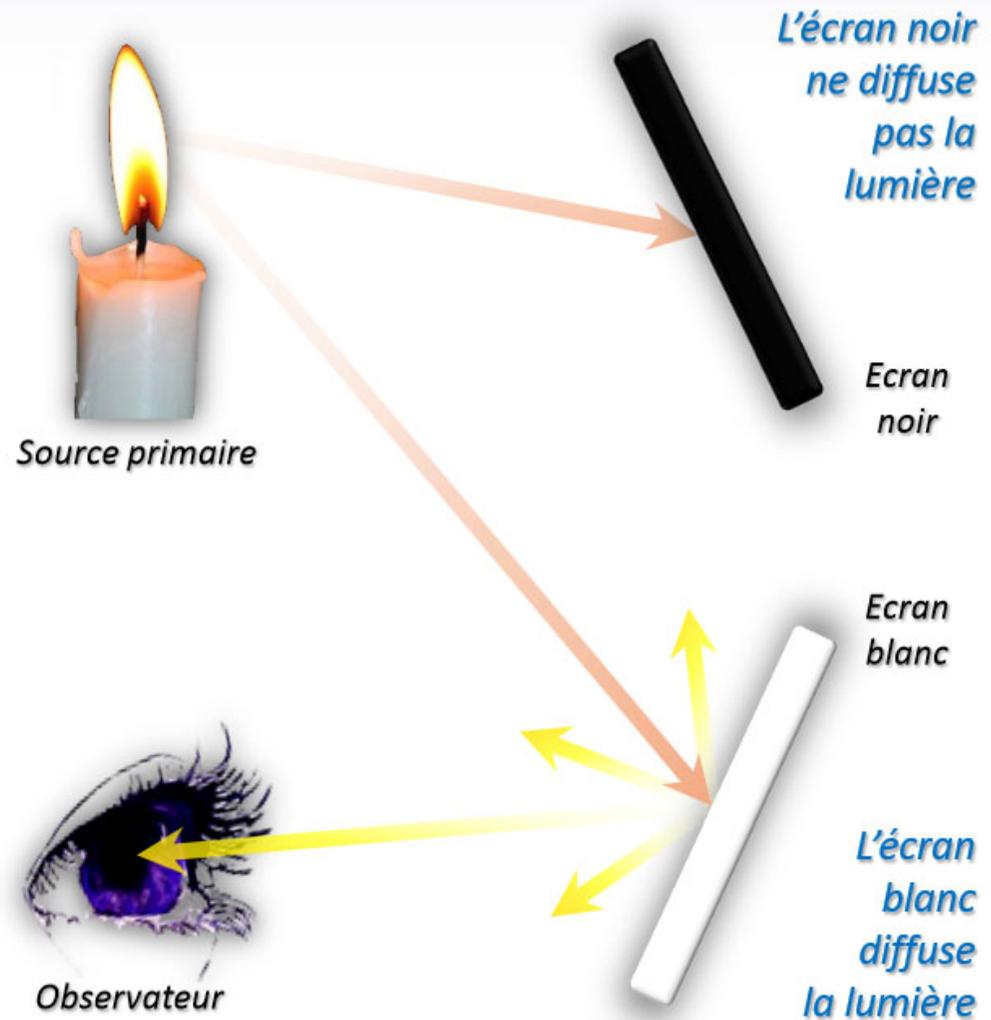
- Un objet diffusant est un objet qui renvoie, dans toutes les directions une partie de la lumière qu'il reçoit. Il peut ainsi éclairer d'autres objets.
- Pour voir un objet, il **doit être éclairé** et l'œil de l'observateur doit **recevoir de la lumière diffusée par cet objet**.



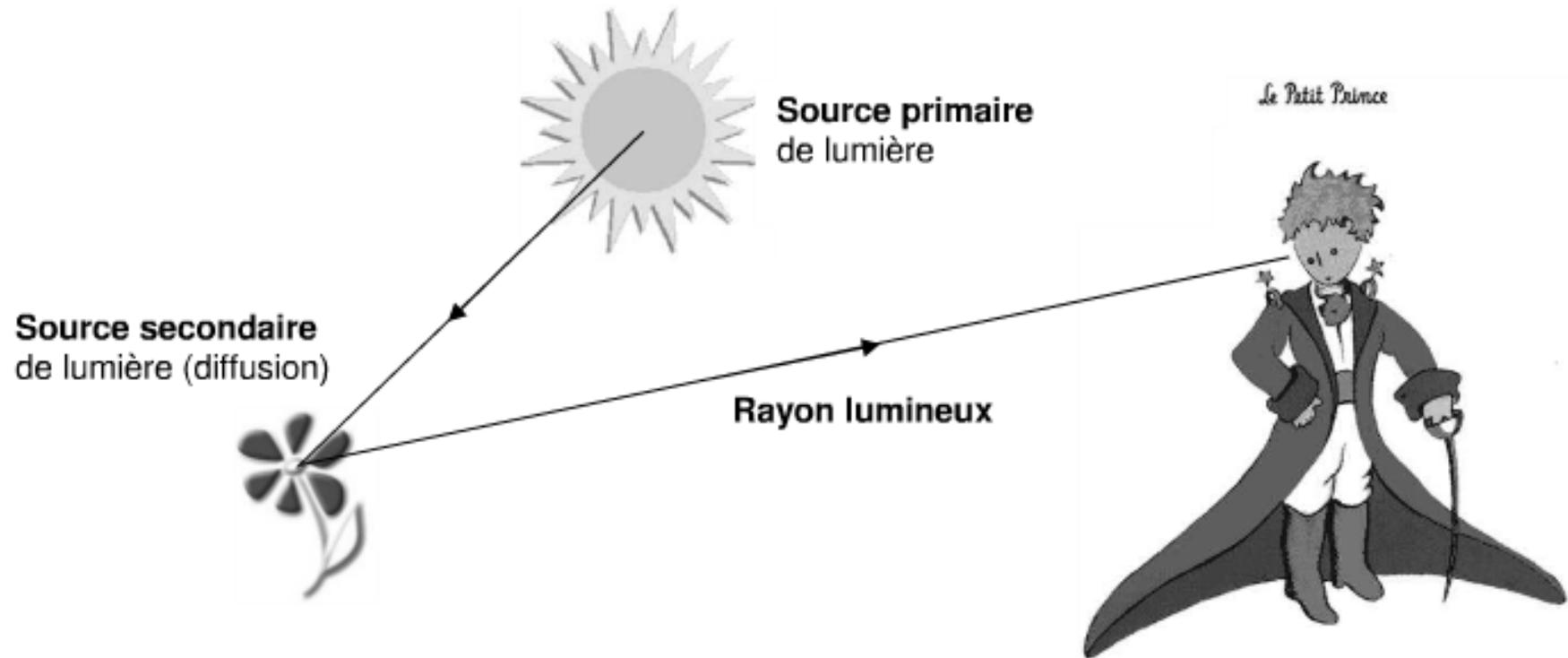
« Voir » signifie « recevoir de la lumière dans les yeux » !

- Condition de visibilité

- Un *objet blanc ou clair* renvoie la lumière qu'il reçoit en la **diffusant**.
- Un *objet noir* ne diffuse pas la lumière, il l'**absorbe**.



Pour que l'on puisse voir un objet, celui-ci doit **produire de la lumière** (le Soleil, une lampe) ou **diffuser celle qu'il reçoit** (la Lune, les pages d'un livre). Après être passée à travers différents milieux transparents, la lumière doit ensuite **pénétrer dans l'œil** (l'objet doit donc être situé dans le champ de vision de nos yeux pour être vu).



Un objet n'est visible que s'il est éclairé.

Un objet éclairé n'est visible que s'il diffuse la lumière.

Un objet, éclairé, n'est visible que si la lumière qu'il diffuse pénètre dans l'œil de l'observateur.

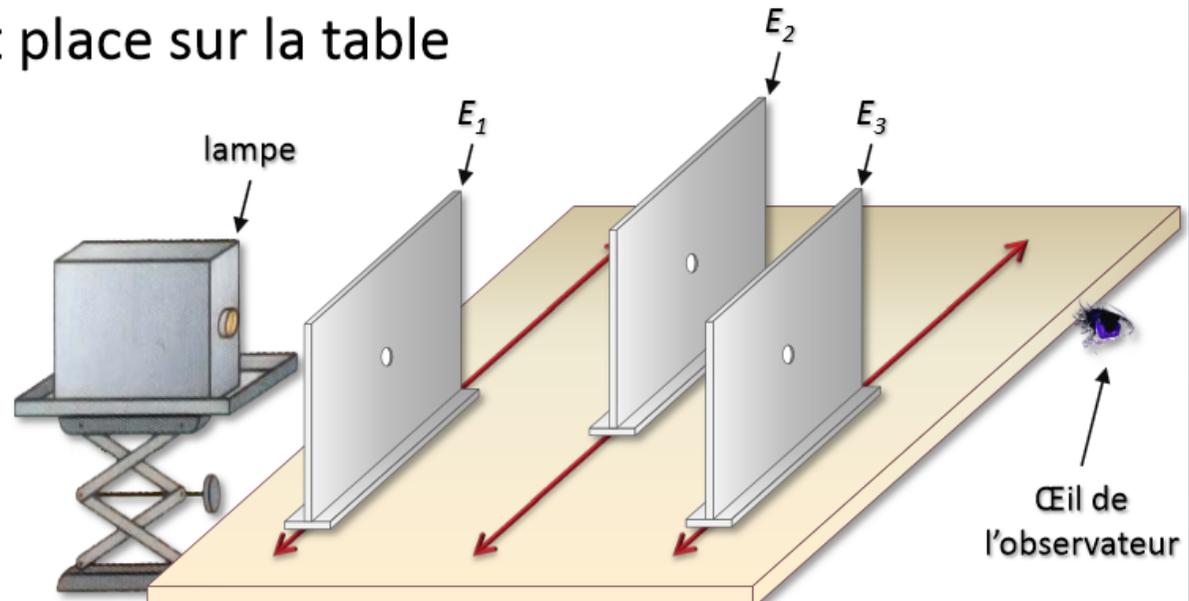
1.3 Propagation rectiligne de la lumière

Expérience :

Tu disposes d'une lampe électrique et de trois écrans munis d'un ou plusieurs trous. Tu disposes aussi d'une tige droite capable de passer par les trous des trois écrans (E_1 , E_2 et E_3).

Allume la lampe et place sur la table les trois écrans.

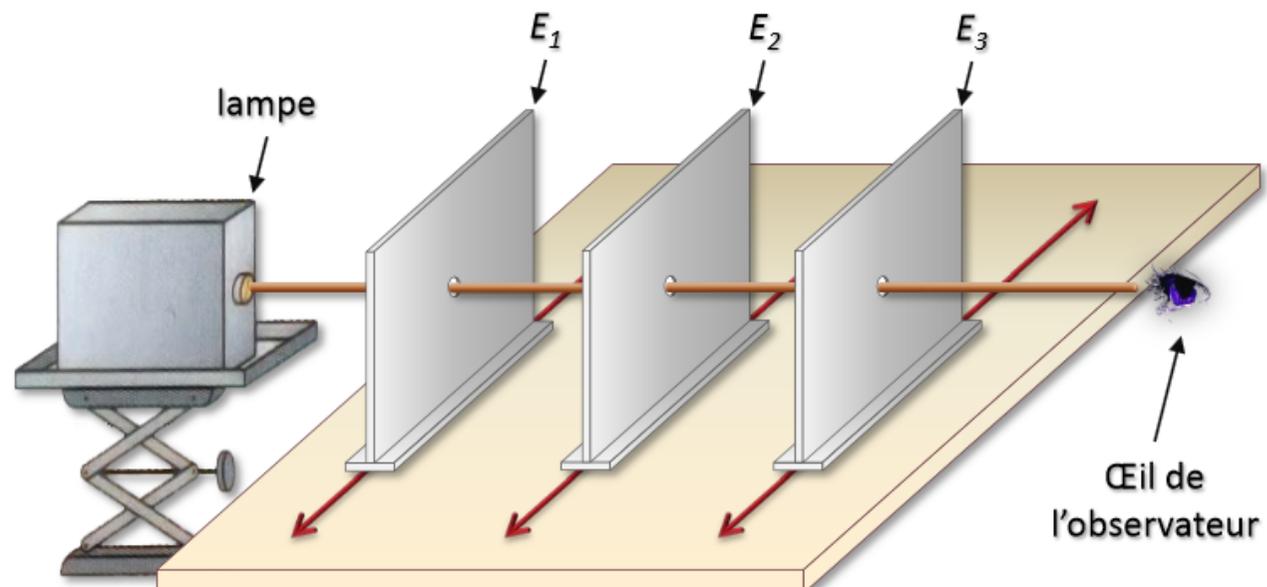
Déplace les écrans pour voir la lampe à travers les trous.



1. Lorsque tu vois la lampe à travers chacun des trous de chaque écran :

a. Peux-tu faire passer la tige droite et rigide par les trois trous ?

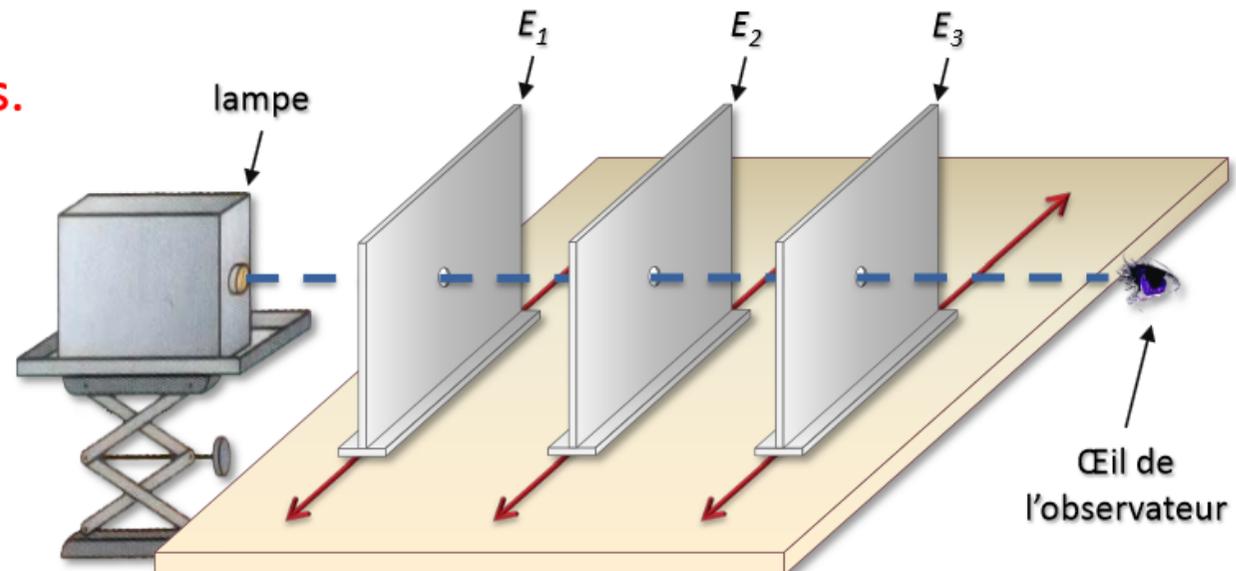
Oui.



1. Lorsque tu vois la lampe à travers chacun des trous de chaque écran :

b. Comment sont disposés la lampe, les trois trous et ton œil ?

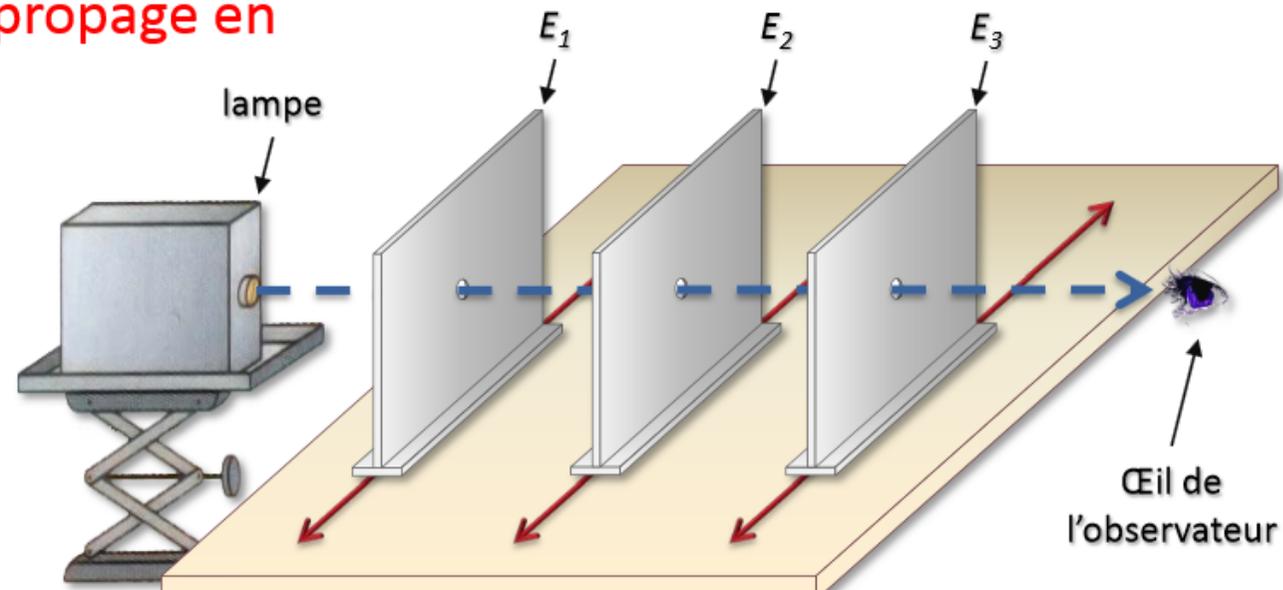
Ils sont alignés.



1. Lorsque tu vois la lampe à travers chacun des trous de chaque écran :

c. Que peux-tu dire du trajet de la lumière ?

La lumière se propage en ligne droite.

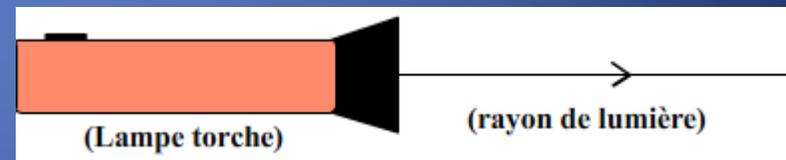


L'expérience précédente a également montré que le *faisceau laser* rendu visible par des poussières de craie ou les gouttelettes d'eau en suspension dans l'air est *rectiligne*.

Conclusion :

Dans un même milieu transparent homogène, la lumière se propage en ligne droite.

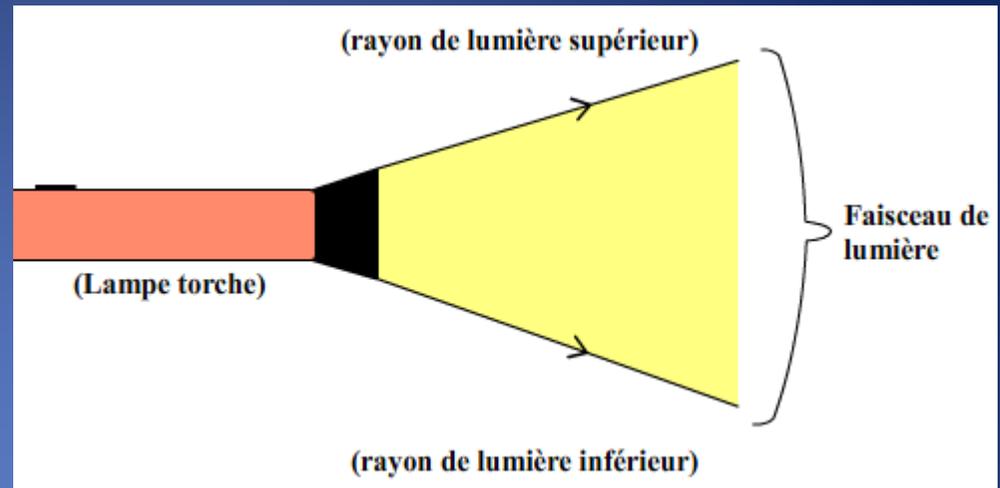
Puisque la lumière se propage de manière rectiligne le trajet suivi par la lumière est représenté par une droite à laquelle on ajoute une flèche afin d'indiquer le sens de propagation.



Un rayon lumineux représente le trajet rectiligne orienté suivi par la lumière.

Une source de lumière émet en général de la lumière dans plusieurs directions. L'ensemble des rayons de lumières correspond alors à un *faisceau de lumière*.

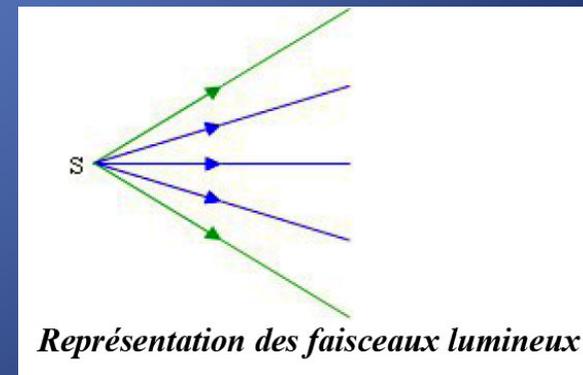
Un faisceau de lumière peut être représenté par les rayons de lumière qui le délimitent.



On admet que les faisceaux lumineux sont composés de rayons lumineux indépendants les uns des autres. Il en résulte que des rayons issus de différents points d'une source lumineuses ne se perturbent pas les uns les autres et que l'on peut étudier la marche d'un rayon lumineux indépendamment de la marche des autres rayons.

La lumière est donc vue comme un *ensemble de rayons*, émis par la source.

Chaque point lumineux de la source émet ainsi des « rayons » qui partent *dans toutes les directions*.

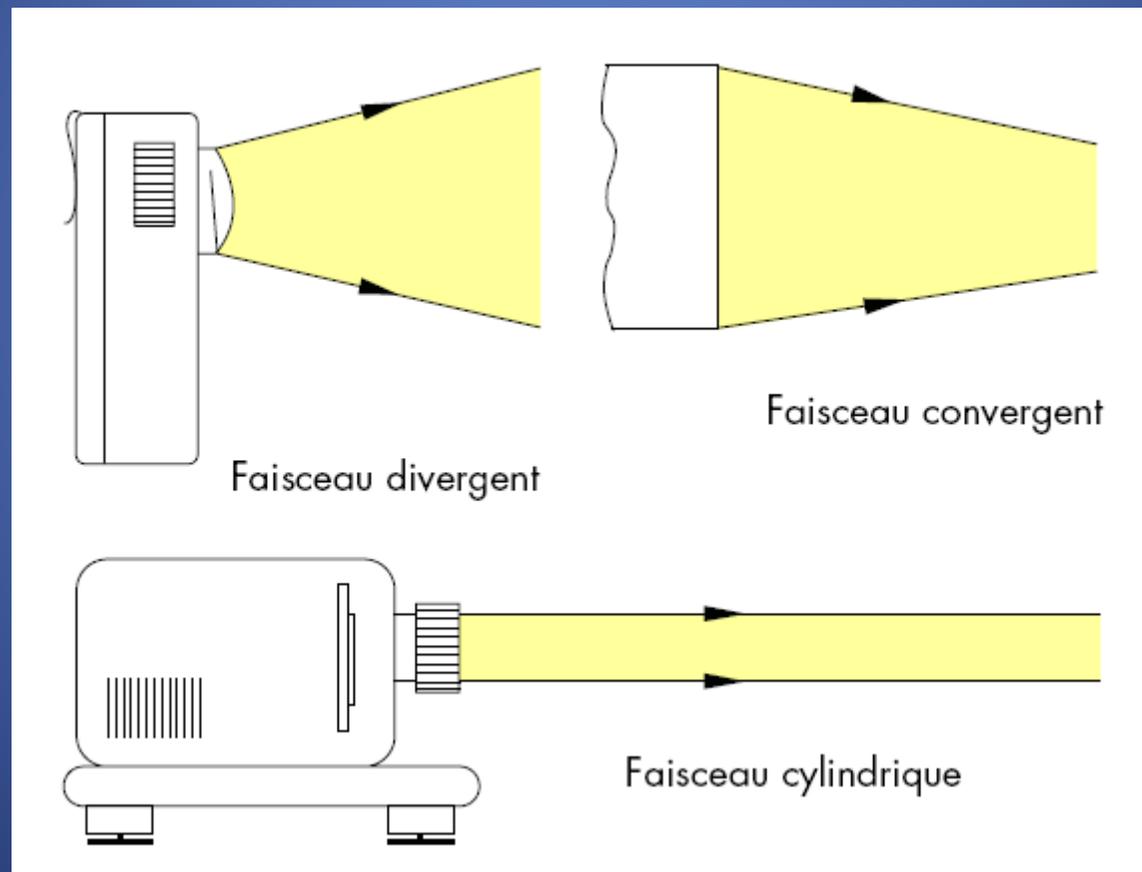


Un faisceau lumineux est dit *convergent* lorsqu'il se resserre.

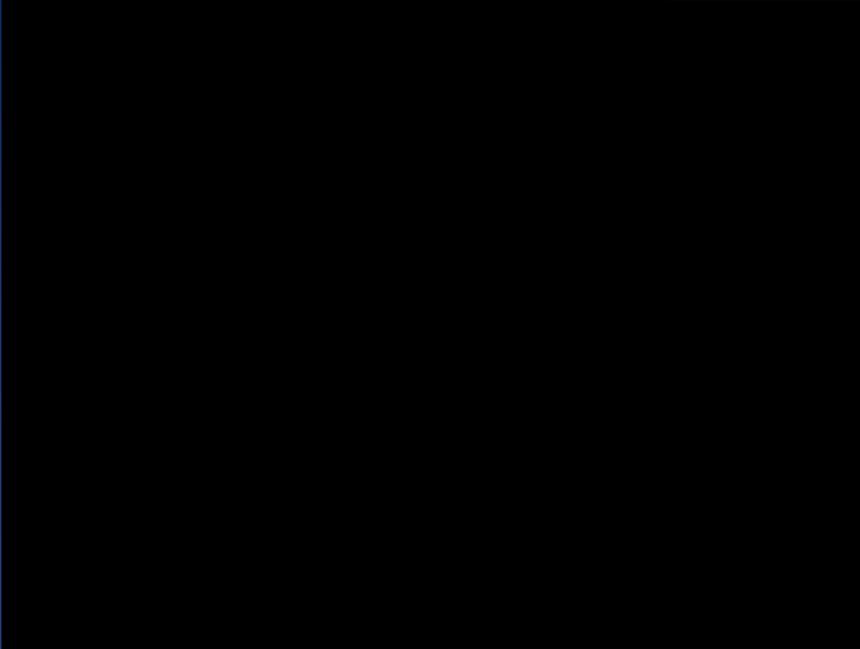
Il est dit *divergent* lorsqu'il s'élargit.

S'il ne se resserre ni ne s'élargit, il est dit *cylindrique*, ou encore *parallèle*.

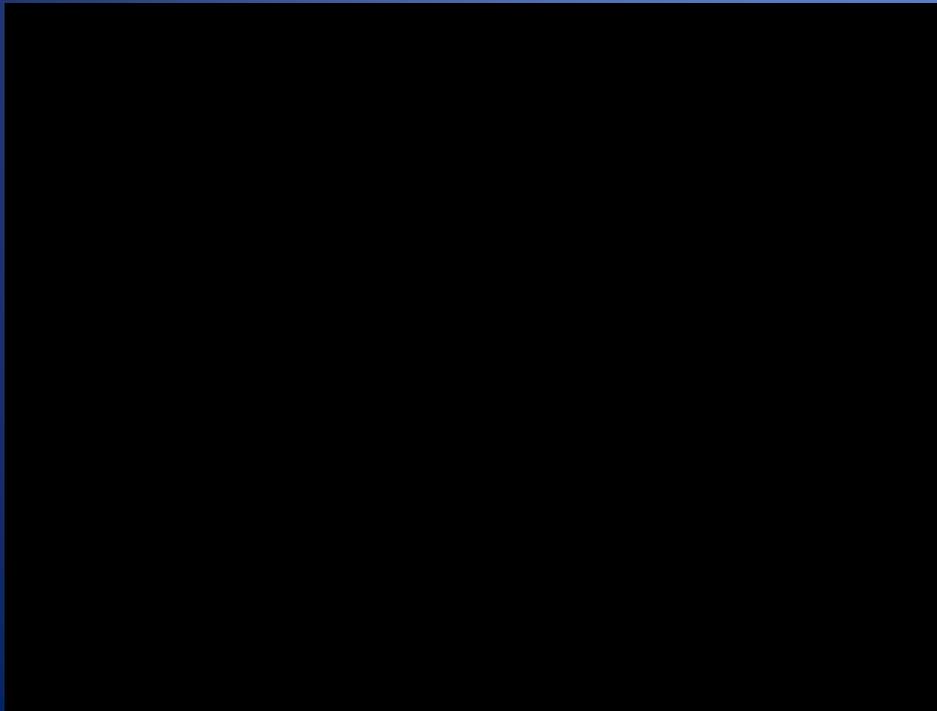
On appelle *pinceau lumineux* un faisceau étroit.



Propagation rectiligne de la lumière



<http://www.youtube.com/watch?v=2JnM3ezLdjE&feature=related>



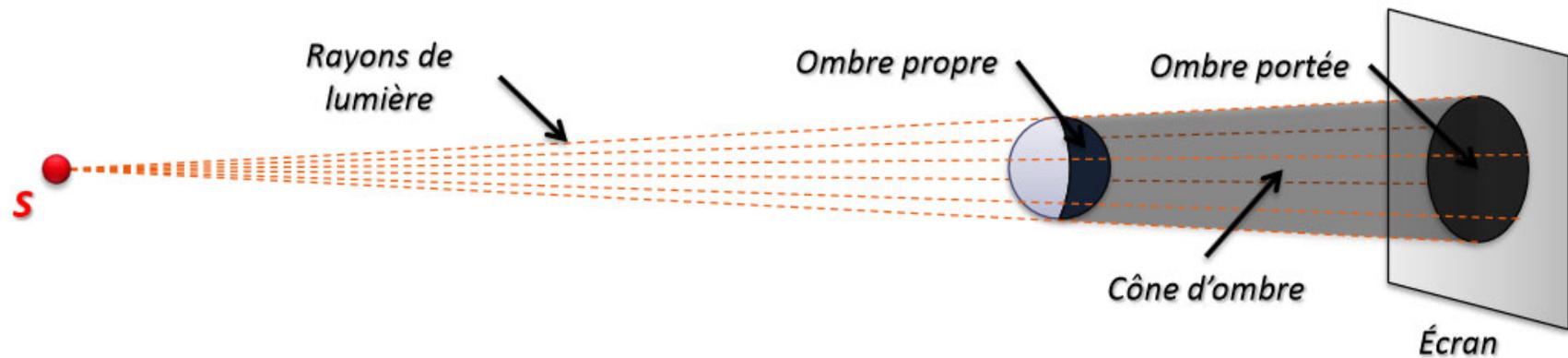
<http://www.youtube.com/watch?v=WtQsq8s8XzU&feature=related>



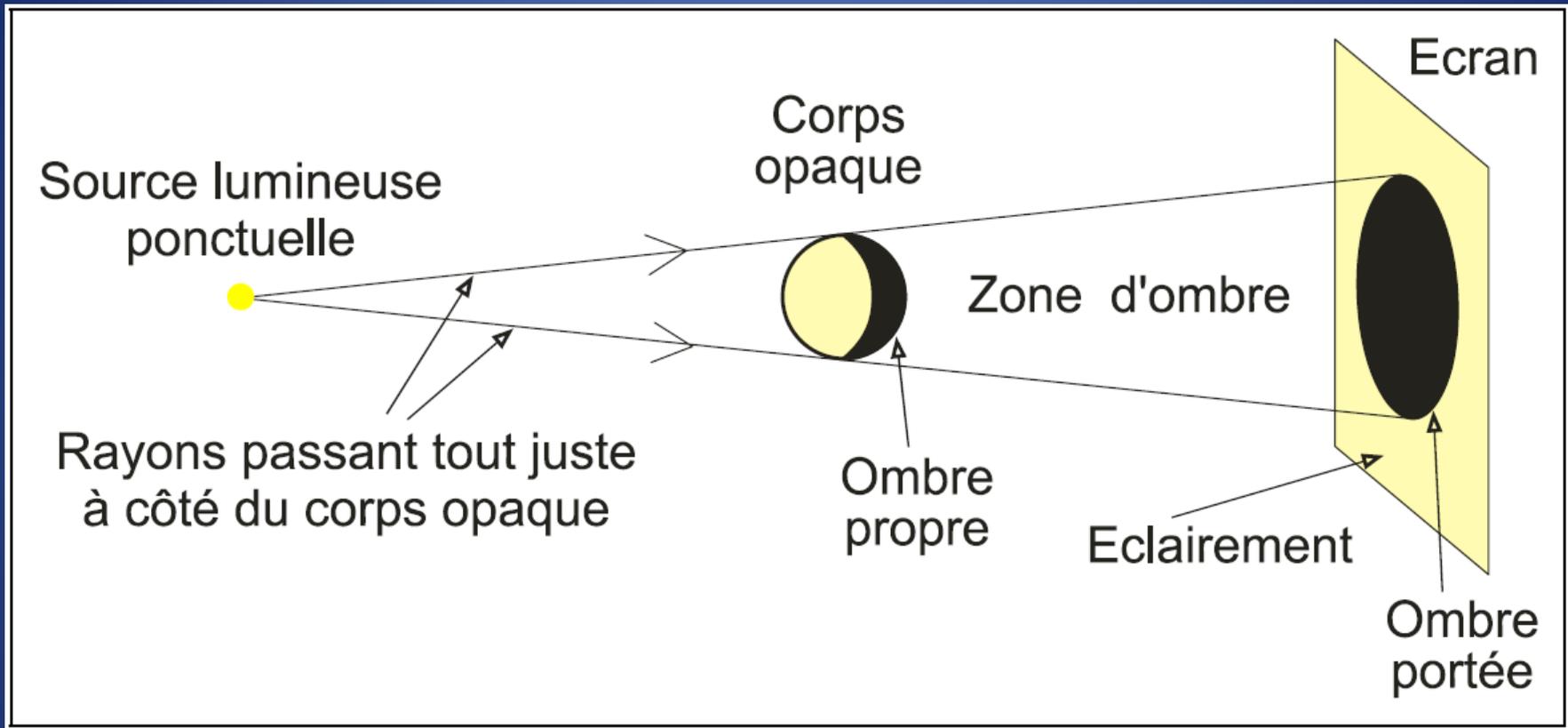
1.4 Lumière et ombre

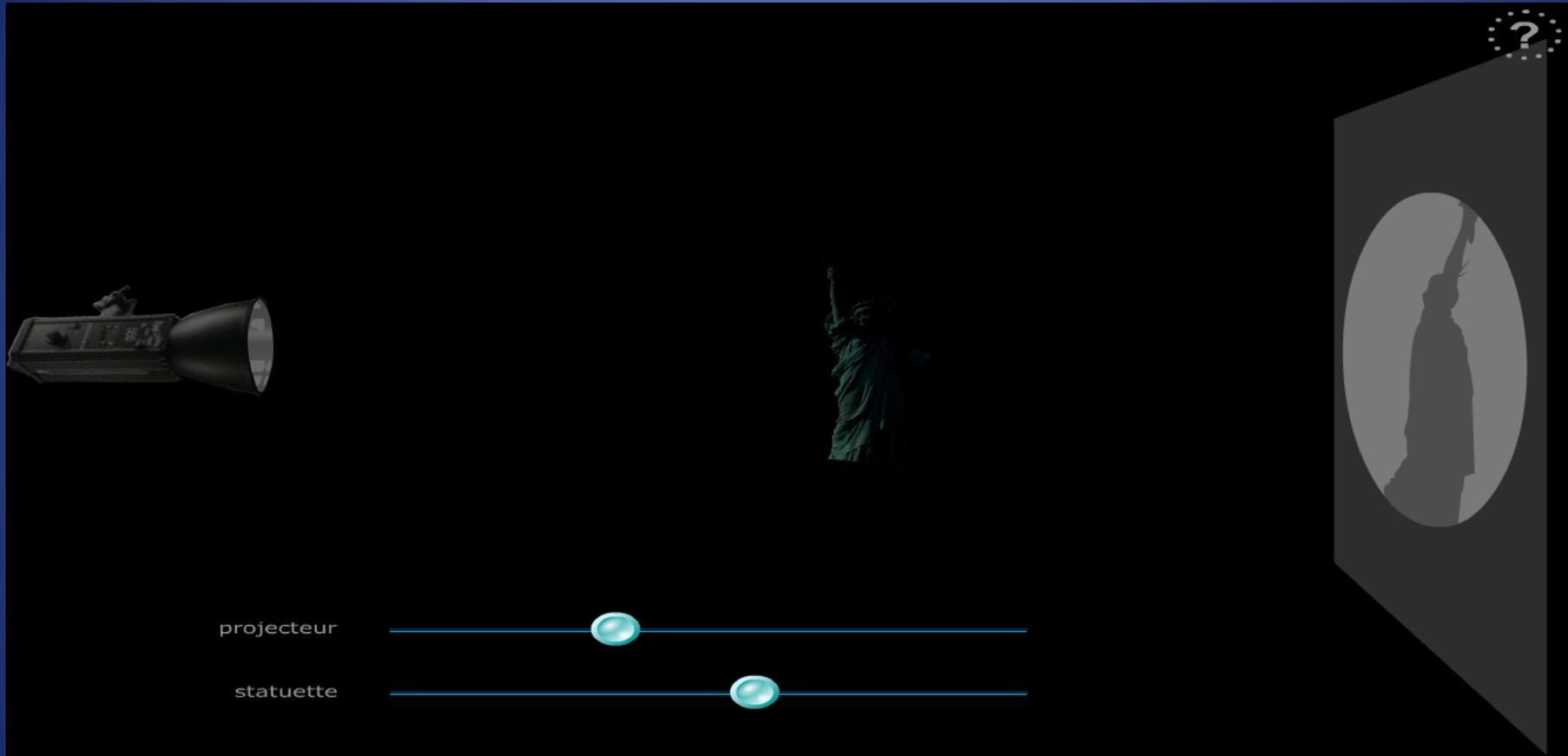
1.4.1 Ombre produite par une source ponctuelle proche

- Lorsqu'un objet opaque, placé devant un écran, est éclairé par une source de lumière, on observe :
 - une zone non éclairée sur l'objet : **l'ombre propre** de l'objet ;
 - une zone non éclairée sur l'écran : **l'ombre portée** de l'objet ;
 - une zone non éclairée entre l'objet et l'écran : **le cône d'ombre**.



La notion de rayon lumineux permet de comprendre la *formation des ombres* portées par des corps opaques :



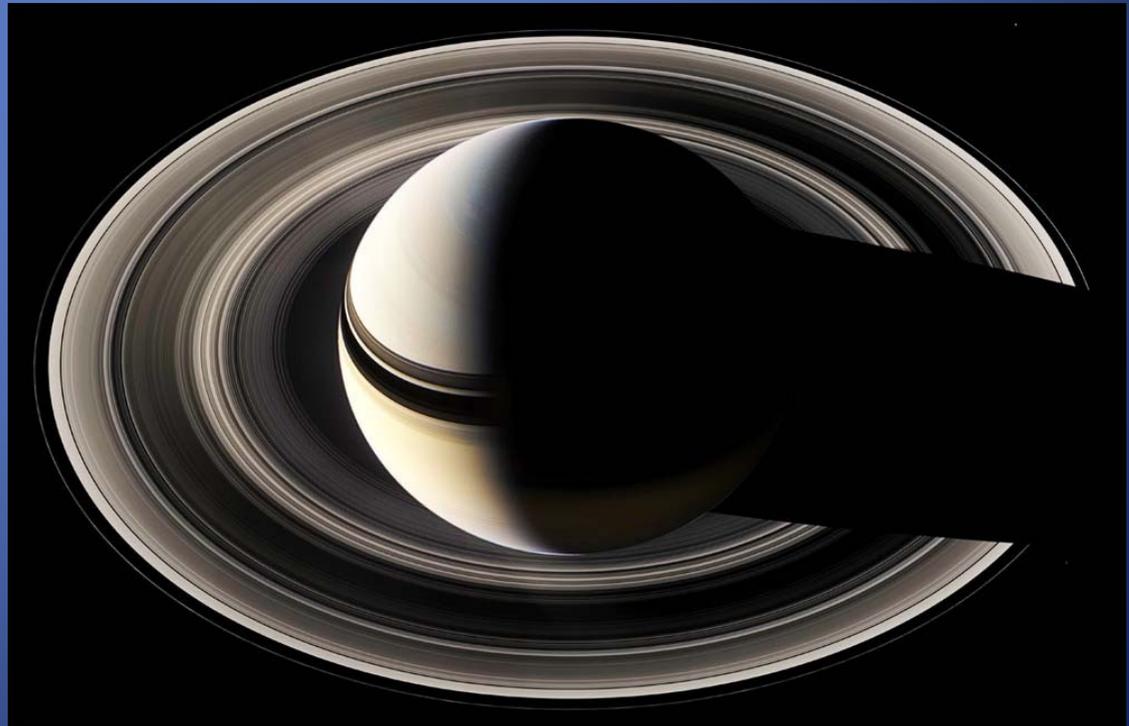


[Fichier en local](#)

http://physiquecollege.free.fr/physique_chimie_college_lycee/cinquieme/optique/ombres.htm



Ombre des anneaux et la plus grande lune de Saturne



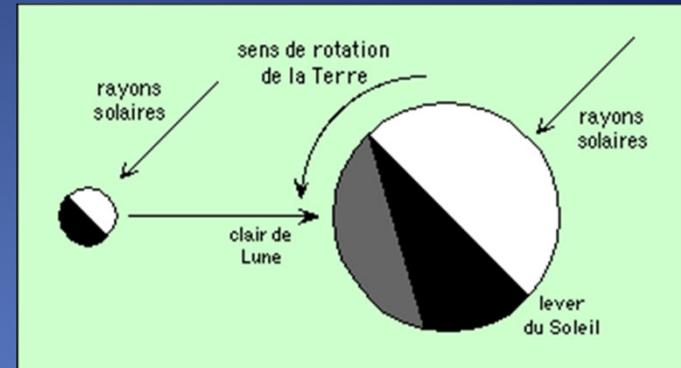
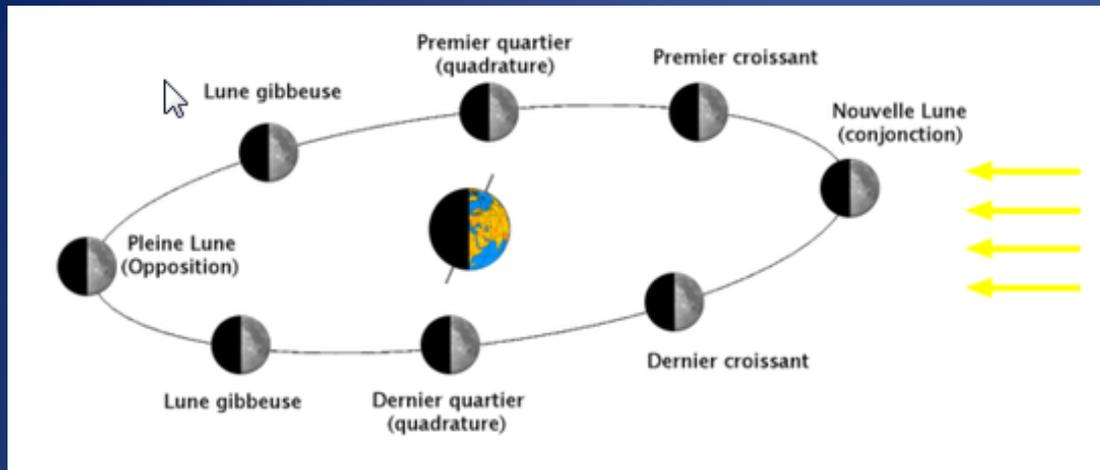
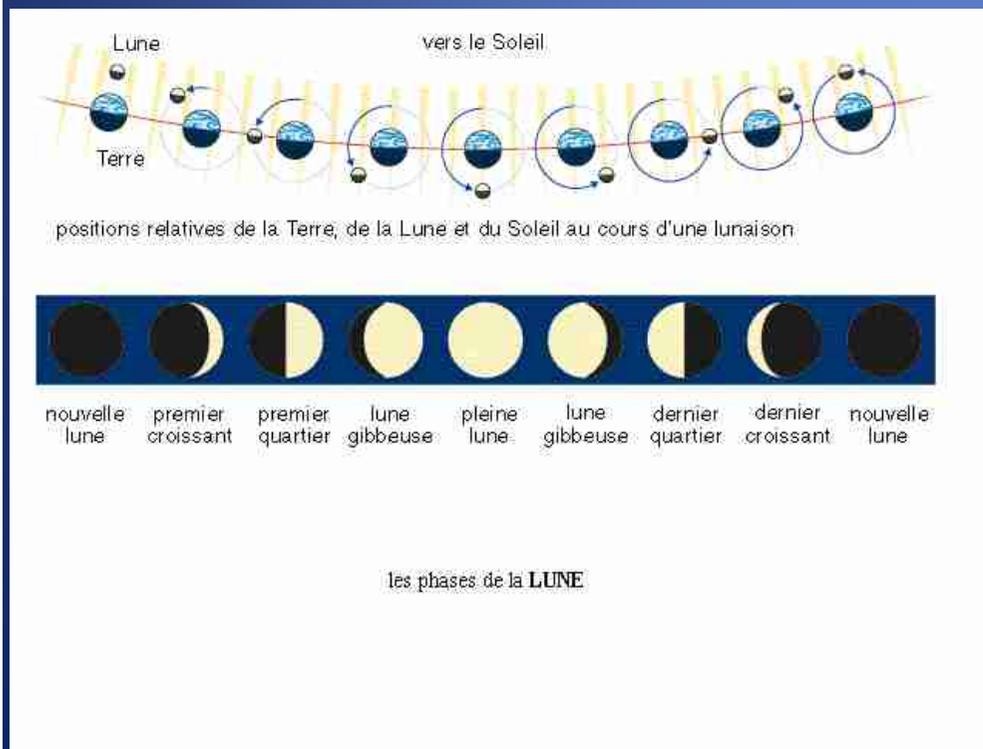
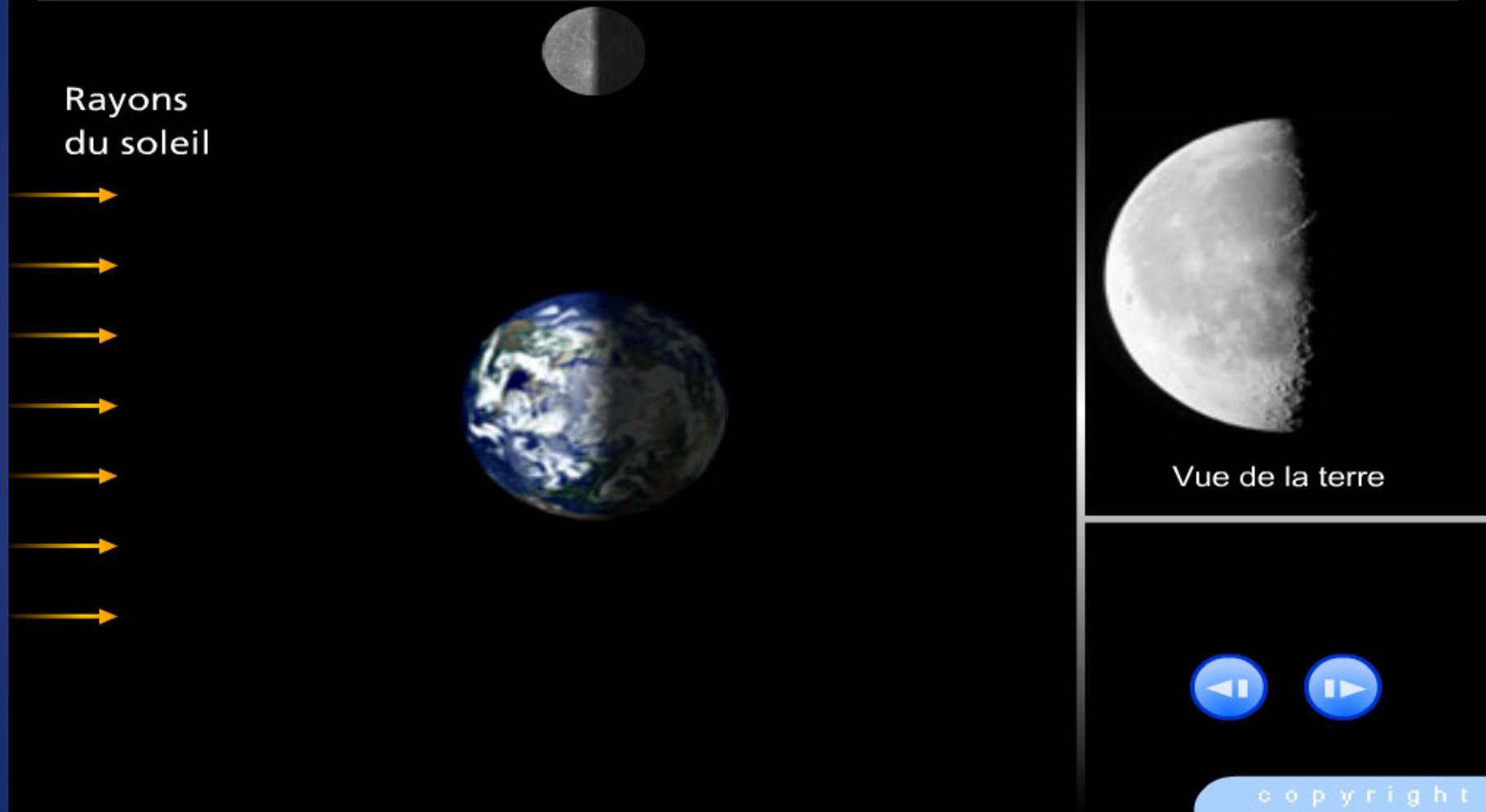


Illustration des zones d'ombres et de lumière : les phases de la Lune



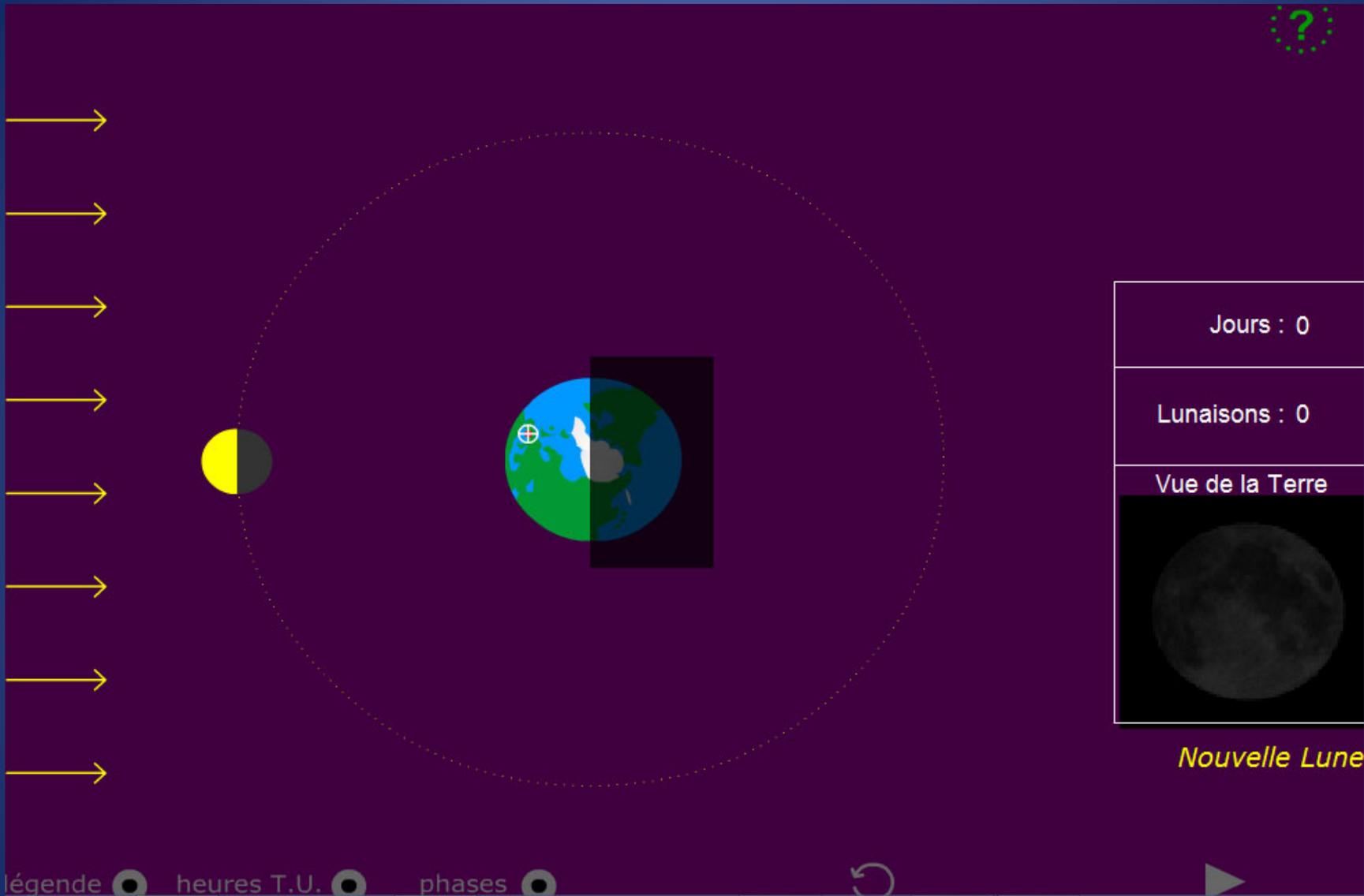
La Lune ne brille pas par elle-même. Elle reçoit de la lumière du Soleil, comme la Terre, et *c'est la lumière qu'elle nous renvoie que nous percevons.* C'est elle qui donne le *clair de lune.*

Si elle brillait par elle-même, comme le Soleil, elle serait toujours pleine !



[Fichier en local](#)

<http://monsieur.bareilles.free.fr/animations/fichiers/PhasesLune.swf>



[Fichier en local](#)

<http://monsieur.bareilles.free.fr/animations/fichiers/phases-lune.swf>

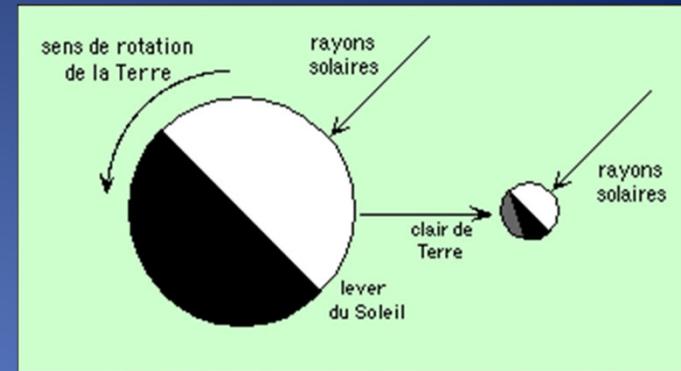


*Le cycle des phases de
la Lune*

*La Terre et la Lune , présentant la même phase,
captées par la sonde Galileo, en partance pour
Jupiter*



Si nous étions sur la Lune, nous verrions la Terre éclairée par le Soleil. Et lorsqu'il fait nuit sur la Lune, on pourrait y admirer le *clair de Terre* !



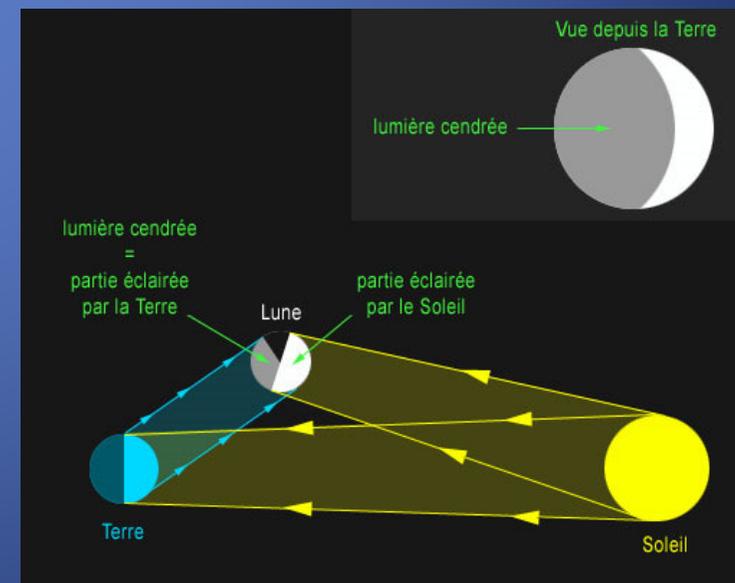
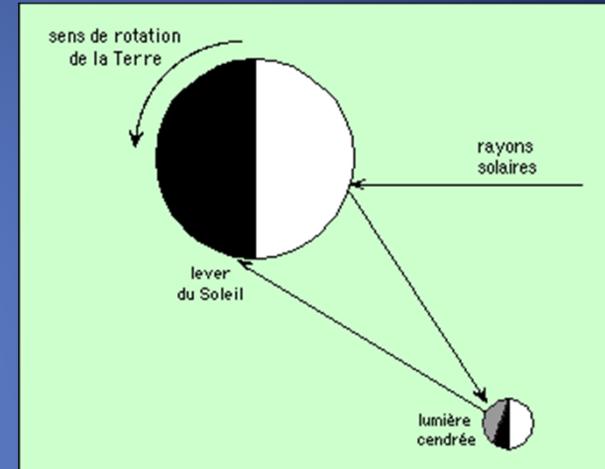
[Un fantastique lever de Terre immortalisé depuis la Lune.wmv](#)

Si on regarde bien, *juste après la nouvelle Lune, on peut distinguer cette partie de la Lune qui est dans la nuit, éclairée par le clair de Terre...* Cette faible lueur porte le joli nom de *lumière cendrée*. Il faut bien comprendre que *c'est de la lumière émise par le soleil, qui se réfléchit une première fois sur la Terre, puis à nouveau sur la Lune, avant de nous revenir*. On conçoit que cette lumière soit faible.

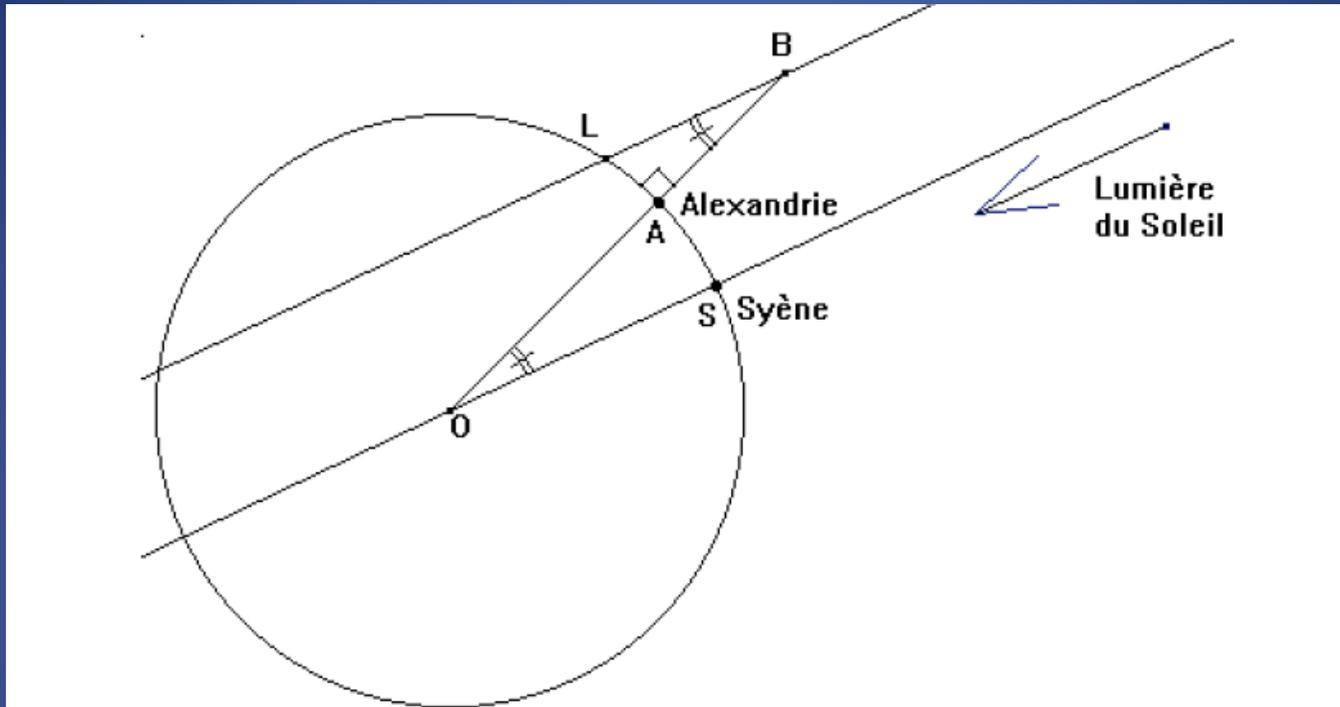
La lumière solaire touche la Terre, sur laquelle elle se réfléchit. Elle arrive ensuite sur la partie de la Lune opposée au Soleil, sur laquelle il fait nuit.

Elle se réfléchit à nouveau sur le sol lunaire, qui est donc visible d'une petite partie de la Terre plongée dans la nuit.

La lumière cendrée est donc *visible juste après le coucher du Soleil le soir, ou bien juste avant le lever du Soleil le matin* (configuration du schéma).

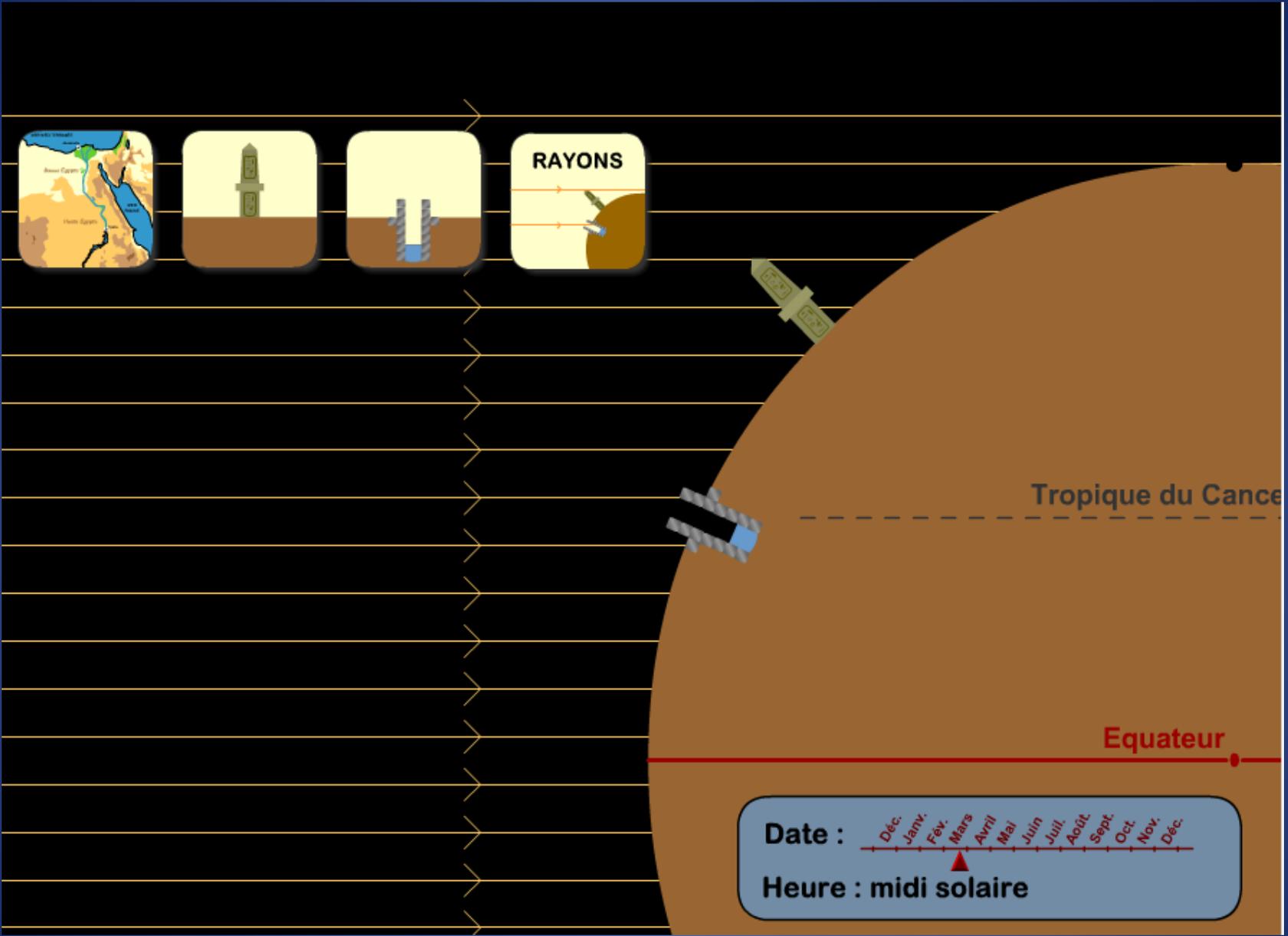


Enfin, il suppose les *rayons du lointain Soleil parallèles* et le triangle BAL rectangle en A.



[AB] : Bâton d'Erathostène de 1,25 m de long

[AL] : Ombre portée par le bâton on mesure $AL = 0,16$ m



[Fichier en local](#)

2a) D'après les mesures d'Eratosthène à Alexandrie, donner une valeur de l'angle ABL.

2b) Que peut-on dire des angles ABL et AOS ?

2c) Connaissant la distance Alexandrie-Syène, calculer la circonférence de la Terre.

2d) Calculer ainsi une valeur approchée du rayon de la Terre.

2a) Dans le triangle ABL rectangle en A, on a : $\tan \widehat{ABL} = \frac{AL}{AB}$ soit encore : $\tan \widehat{ABL} = \frac{0,16}{1,25} = \frac{16}{125} = 0,128$

Ainsi, on obtient à l'aide de la calculatrice : $\widehat{ABL} = \tan^{-1}(0,128) \approx 7,294$

L'angle \widehat{ABL} est d'environ $7,3^\circ$ au dixième près.

2b) Les rayons du soleil sont supposés parallèles ainsi : $(BL) \parallel (OS)$. De plus, ces deux droites sont coupées par une sécante (OB).

Les angles alternes-internes formés par deux parallèles coupées par une sécante sont de même mesure.

Les angles \widehat{ABL} et \widehat{AOS} sont donc de même mesure et on a : $\widehat{ABL} = \widehat{AOS} \approx 7,3^\circ$.

2c) Soit C la circonférence de la Terre, on utilise un tableau de proportionnalité suivant :

	Alexandrie-Syène	Tour de la Terre
Angle en degré	7,3	360
Distance en km	800	C

Ainsi, on a : $\frac{7,3}{800} = \frac{360}{C}$ soit encore : $7,3 C = 800 \times 360$ soit finalement : $C = \frac{800 \times 360}{7,3} \approx 39452$

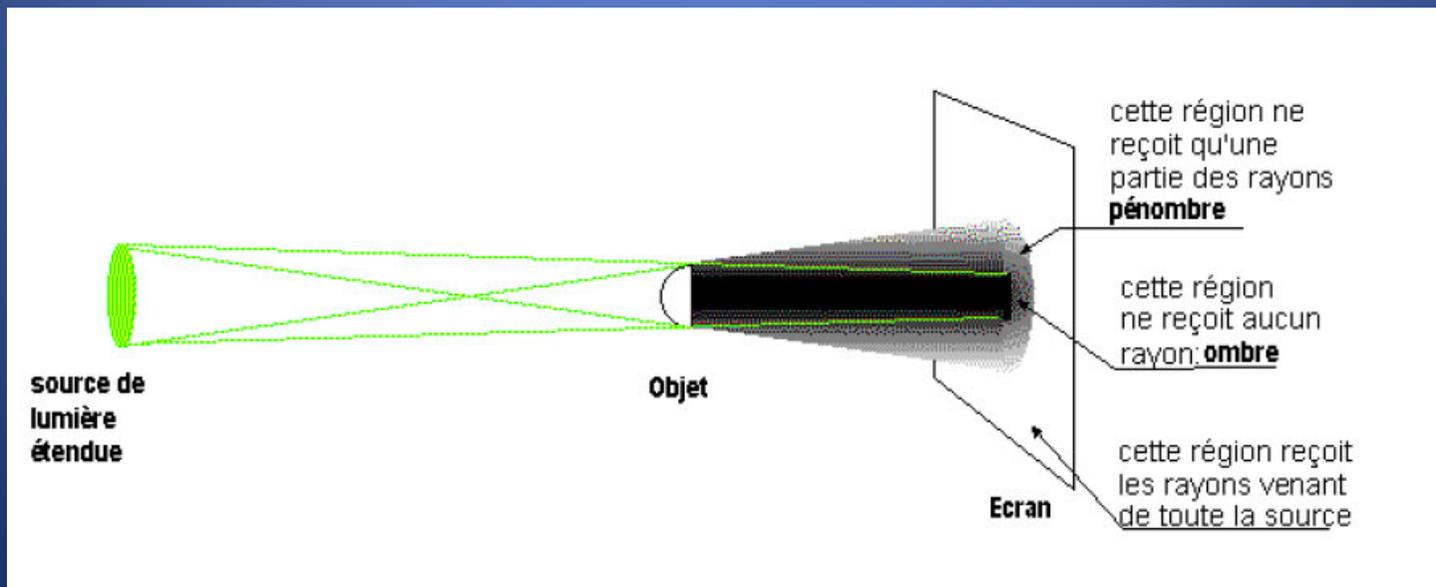
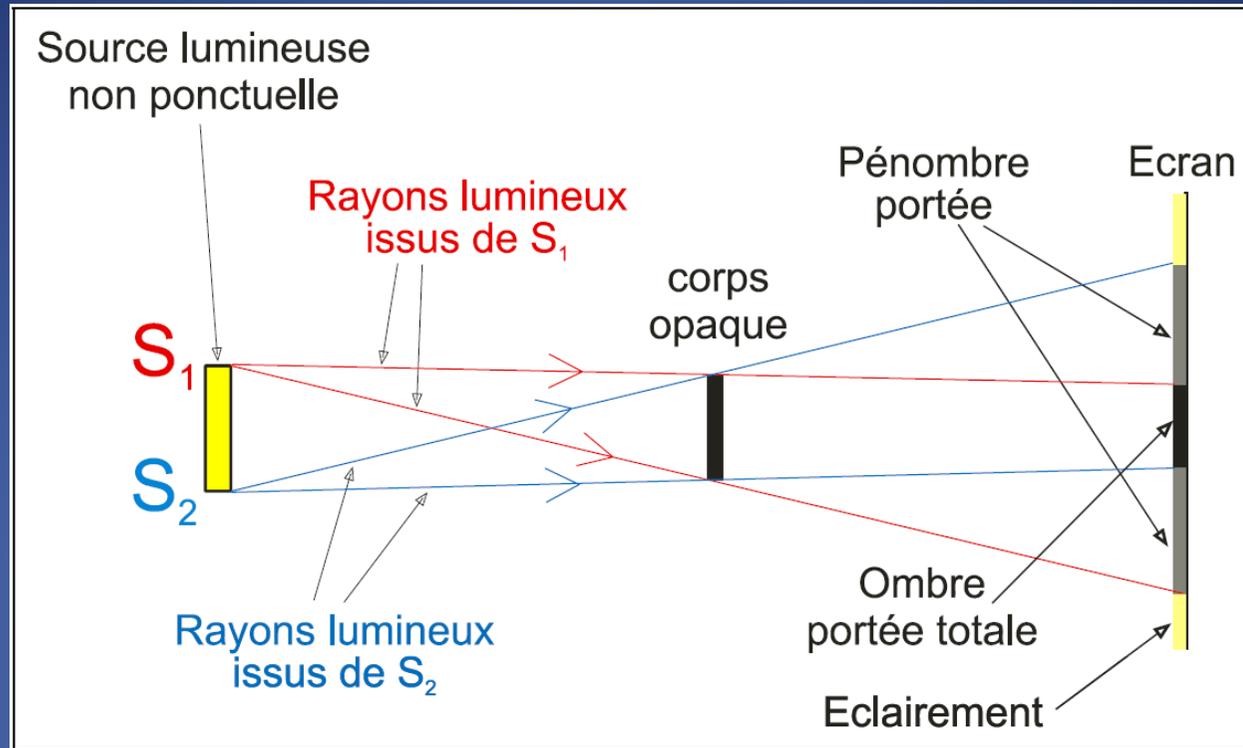
La circonférence de la Terre est d'environ 39 452 km.

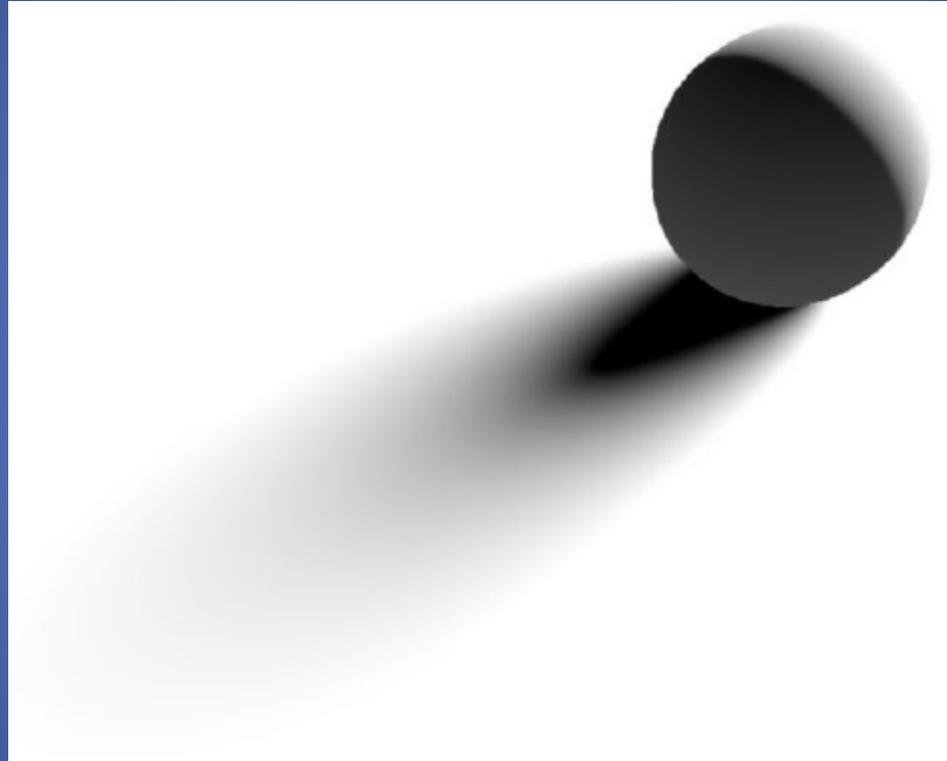
2d) On utilise la formule de la circonférence d'un cercle : $C = 2\pi \times R$ On a donc :

$39\,452 = 2\pi \times R$ soit encore : $R = \frac{39\,452}{2\pi} \approx 6\,278,9$

La rayon de la Terre est d'environ 6 279 km au km près.

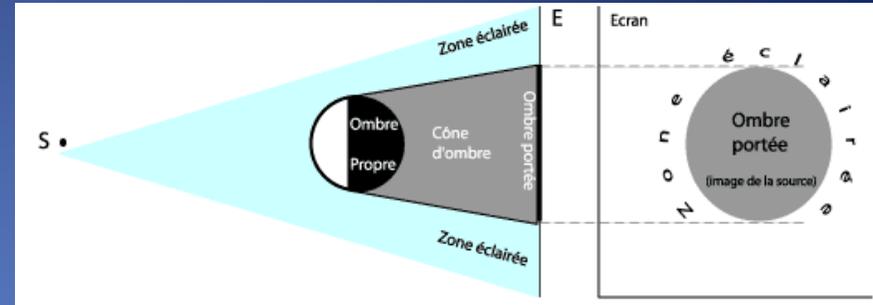
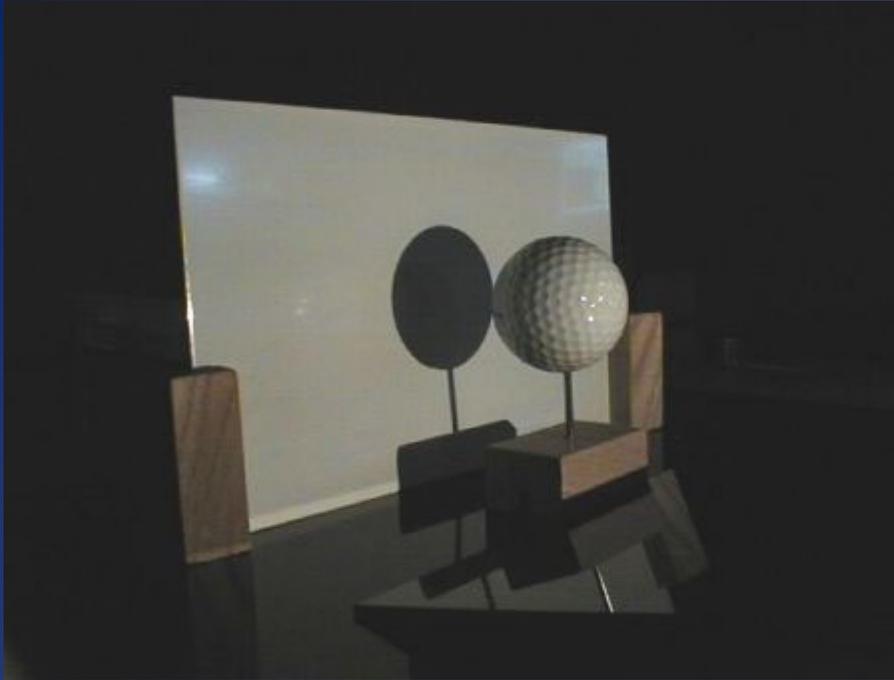
1.4.3 Ombres produites par une source étendue



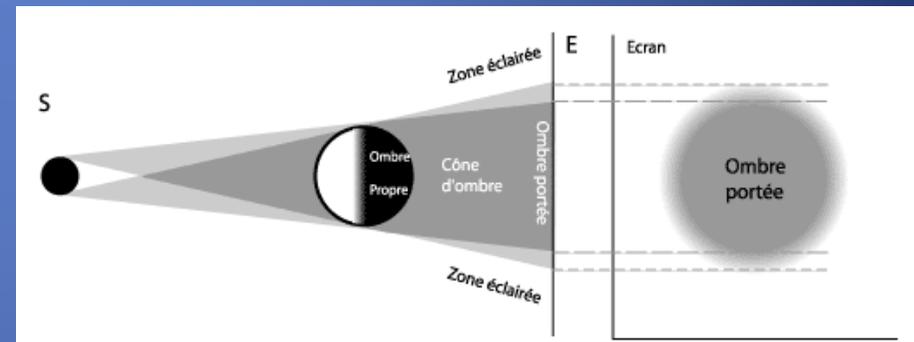
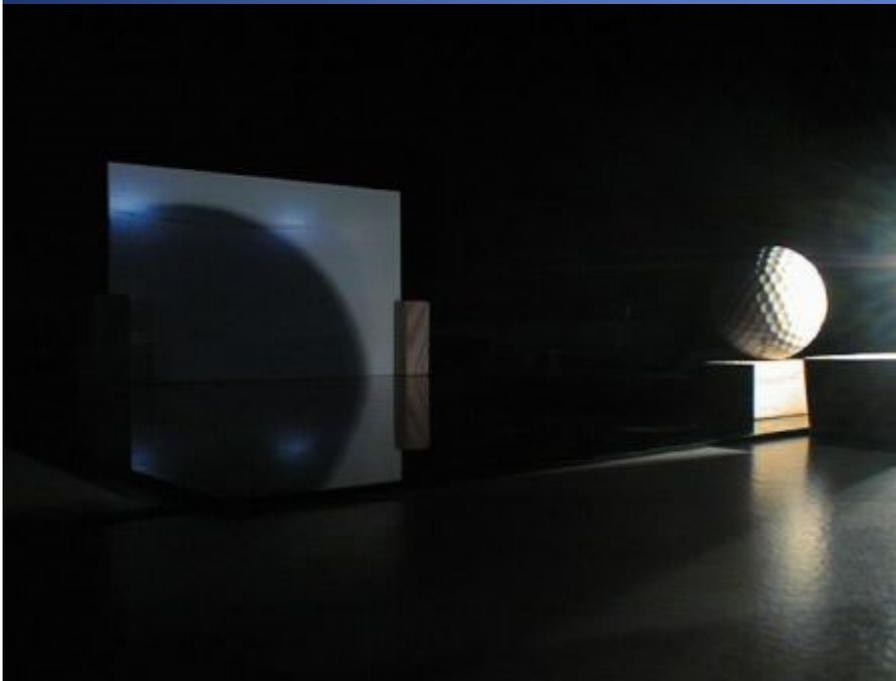


Ombre d'une sphère illuminée par une source lumineuse étendue

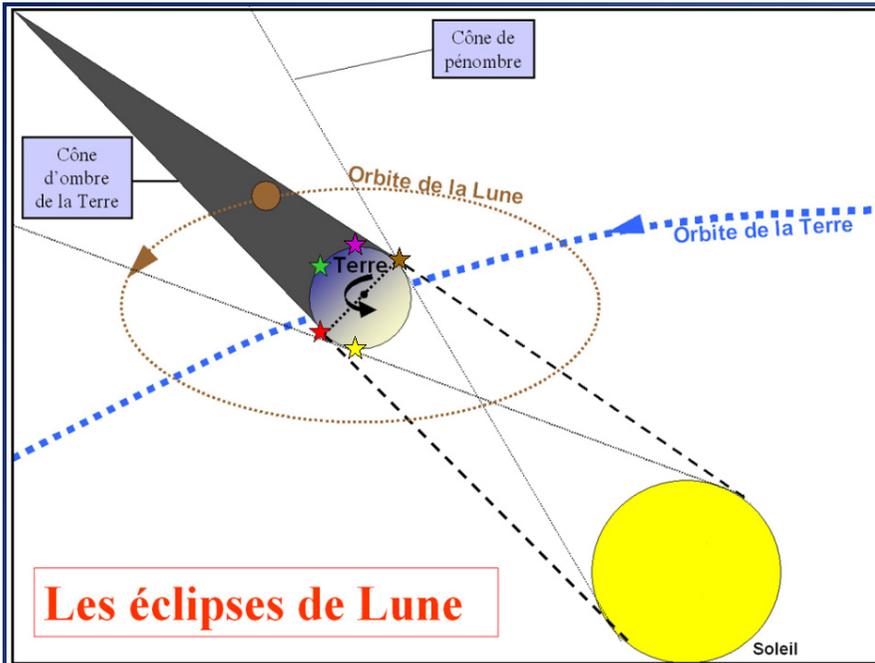




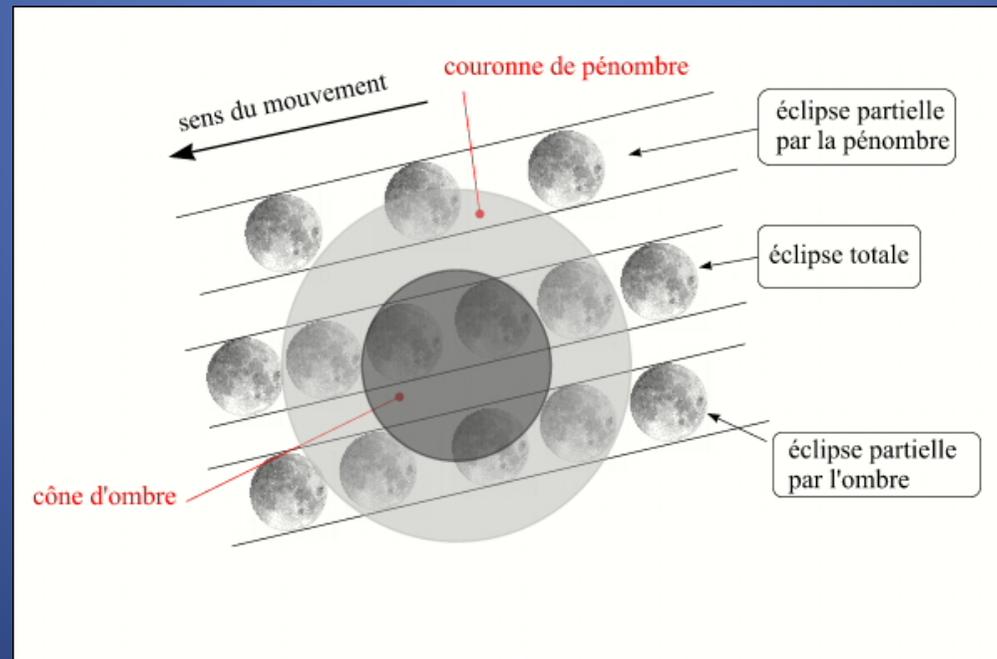
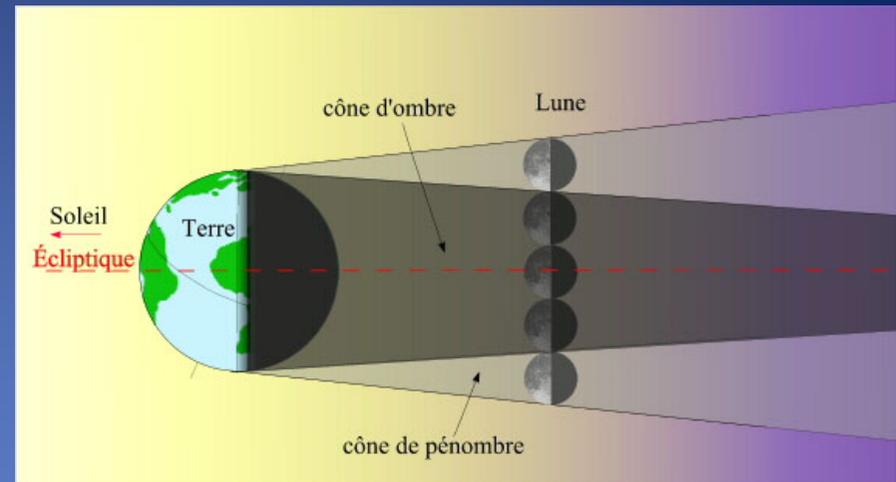
L'objet est loin d'une source de petites dimensions : *la source est ponctuelle*. Sur l'écran l'ombre portée est nette et contrastée : *on passe sans transition de la zone d'ombre à la zone éclairée*.



L'objet est près de la source et/ou la source est étendue. Sur l'écran *l'ombre portée est floue* : on passe progressivement de la zone d'ombre à la zone éclairée en traversant une *zone de pénombre*.



Les éclipses de Lune



http://media4.obspm.fr/public/AMC/pages_eclipses-lune/introduction-geometrie-eclipses-lune.html

Déroulement d'une éclipse de Lune

Au stade 1, la Lune n'est pas encore rentrée dans l'ombre de la Terre, mais est seulement *dans la pénombre*. Rien ne se remarque à l'œil nu.

Les stades 2 à 8 correspondent à *l'entrée progressive de la Lune dans l'ombre de la Terre*. Ces photos ont été prises avec une durée de pause très brève. La partie éclairée de la Lune n'est pas surexposée ; la partie à l'ombre paraît noire.



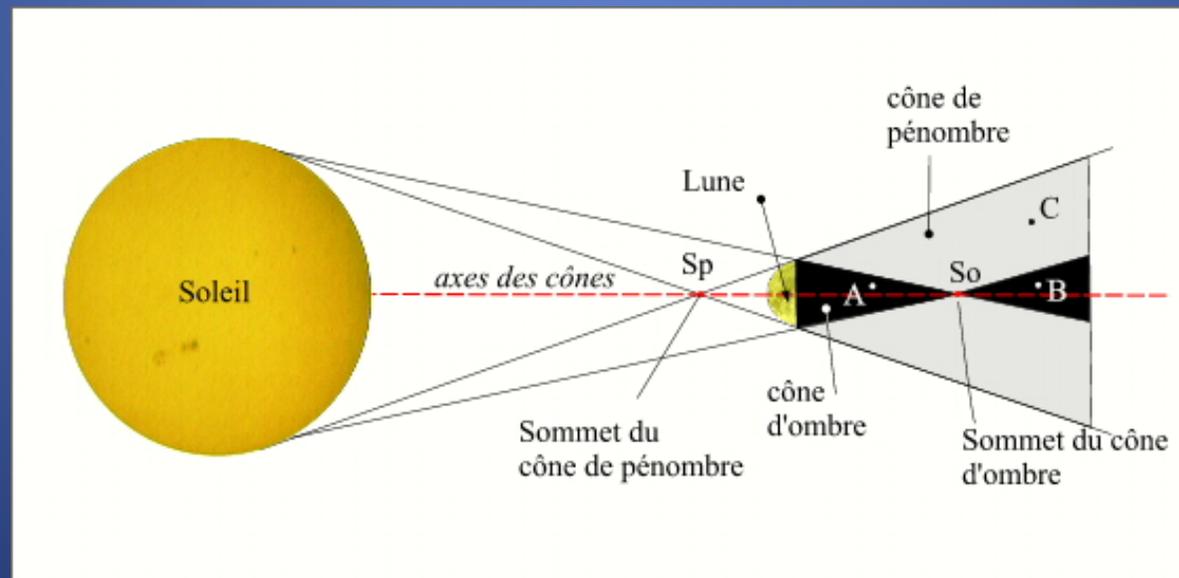
Le stade 9 est quasiment le même que le stade 8, mais la pose est plus longue. La part du disque lunaire encore éclairée paraît surexposée. La part du disque lunaire à l'ombre devient visible et est (en général) de couleur rouge brique à rouge sang.

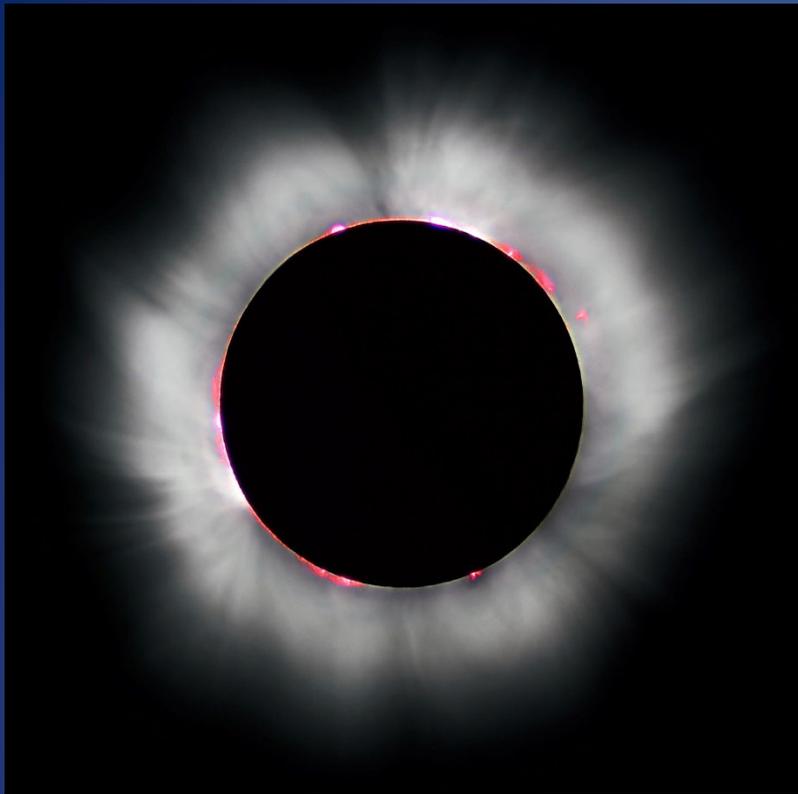
Le stade 10 correspond au *début de la phase totale*. La pose est très longue. La partie Sud de la Lune, à l'ombre certes, mais relativement près du bord de l'ombre est beaucoup plus lumineuse que la partie Nord. Toute la Lune a alors une superbe couleur rouge sang.

Les éclipses de Soleil

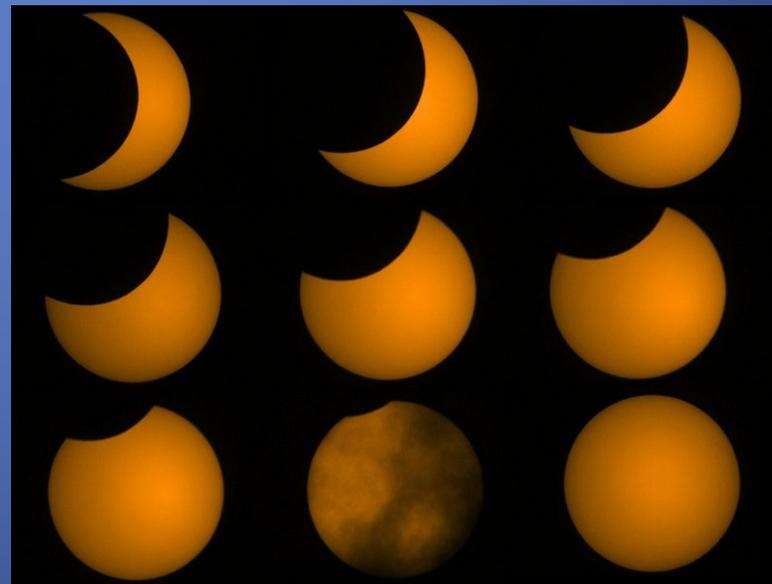
La Lune, éclairée par le Soleil, donne naissance, dans la direction opposée au Soleil à **deux cônes**, un **cône d'ombre** et un **cône de pénombre**. La droite joignant le centre du Soleil et le centre de la Lune constitue l'axe de ces cônes. Le **cône d'ombre** est construit à l'aide des **tangentes extérieures aux sphères solaire et lunaire**, le **cône de pénombre** est construit à partir des **tangentes intérieures aux sphères solaire et lunaire**.

Pour un **observateur A** placé dans le cône d'ombre, avant son sommet il y a **éclipse totale** du Soleil, pour un **observateur B** situé dans le prolongement du cône d'ombre, donc après le sommet du cône d'ombre, il y a **éclipse annulaire** du Soleil. Lorsqu'un **observateur C** se trouve dans le cône de pénombre, il assiste à une **éclipse partielle**, donc un passage partiel de la Lune devant le Soleil.

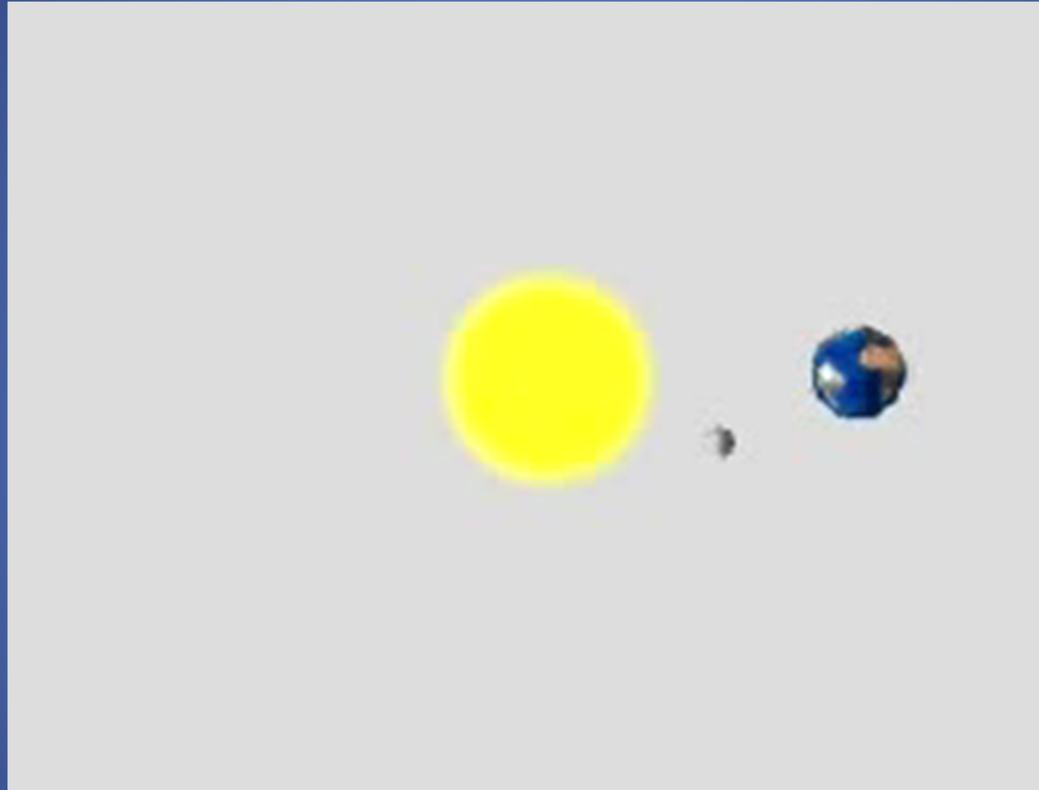




Éclipses de Soleil totale, annulaire et partielle



Ombre et pénombre : éclipses de Soleil et de Lune

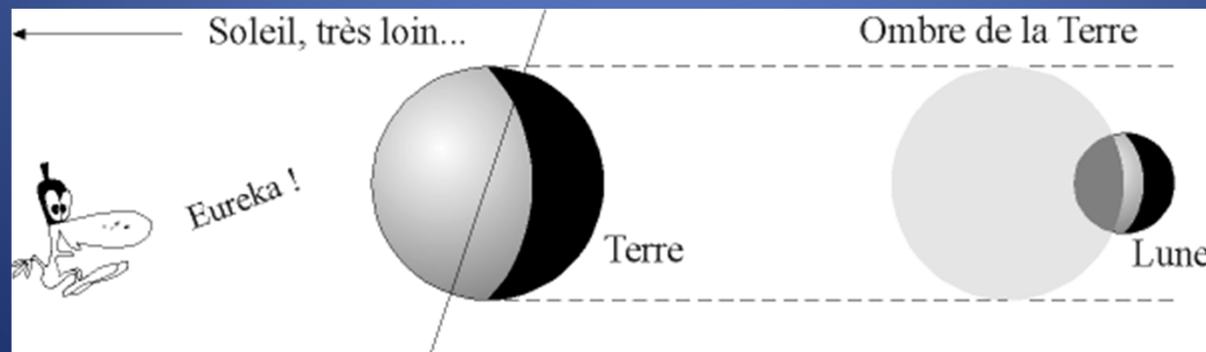


<http://www.youtube.com/watch?v=iISkZQafybk&feature=related>

1.4.4 Application des éclipses de Lune : mise en évidence de la rotondité de la Terre ; estimation de la distance Terre-Lune et de la taille de la Lune

Les Anciens ont d'abord cru que la *Terre* était *plane*. Cette conception, attestée chez la plupart des *Présocratiques* (Anaximène, Anaximandre, Parménide, Héraclite, Empédocle, etc.) a duré assez longtemps dans l'ancienne Grèce. Cependant, *Pythagore* et peut-être *Thalès*, à qui l'on attribue d'avoir connu le *mécanisme des éclipses*, ont reconnu précocement que la *Terre* était *ronde*, ou plutôt *sphérique*.

Une explication correcte du phénomène des éclipses de Lune conduit à reconnaître la forme de la Terre dans celle de l'ombre qu'elle projette sur la surface lunaire.



En haut, entrée dans l'ombre (à droite, pose courte), pendant la phase totale (au centre, pose longue) et pendant la sortie de l'ombre (à gauche, pose courte).

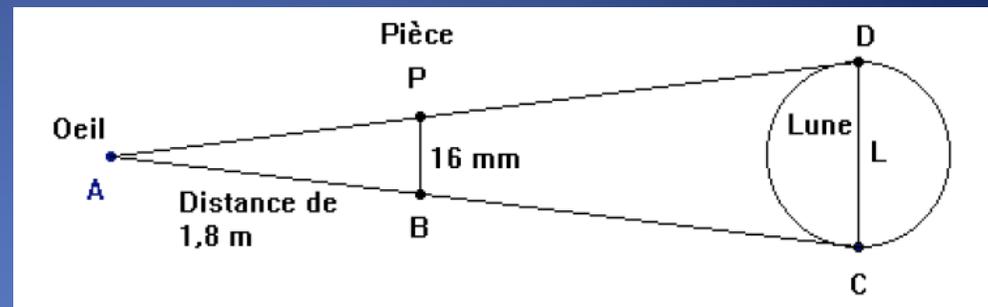
Grâce à une monture équatoriale, l'orientation de l'appareil photo était fixe par rapport à la position de l'ombre de la Terre, et le mouvement de la Lune par rapport à l'ombre de la terre est parfaitement visible.

En bas, même *photo-montage avec la matérialisation de l'ombre circulaire de la Terre.*



1.4.5 Calcul de la distance Terre-Lune en fonction du diamètre de la Lune par Thalès (-625 à -546)

Lors d'une belle nuit étoilée, avec une Lune haute dans le ciel, on arrive à *superposer une pièce de monnaie de 1 centime d'euro* (diamètre ?) *sur la Lune* en visant consciencieusement et en la tenant à une distance de 1,8 m.



La Lune peut également être à peu près masquée par un pouce « tendu à bout de bras » !

On suppose à ce moment que la pièce et l'axe de la Lune sont parallèles.

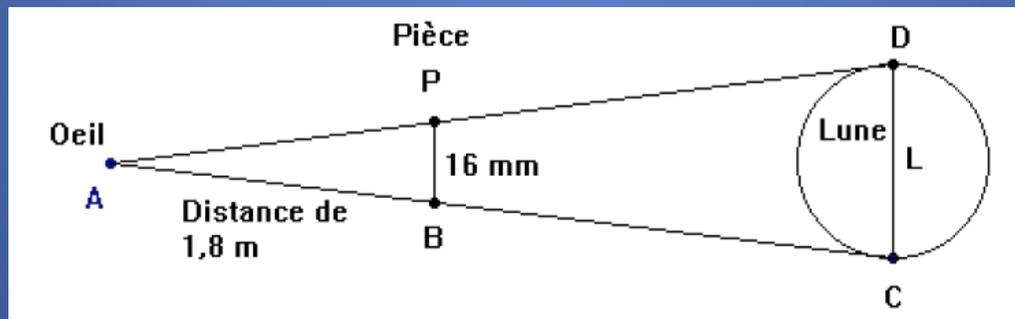
1a) Calculer la *distance Terre-Lune en fonction du diamètre L* de la Lune.

- Dans le triangle ACD, on a : $P \in [AD]$ et $B \in [AC]$. De plus les droites (BP) et (CD) sont parallèles.
- On applique le théorème de Thalès : Les longueurs des côtés des triangles ABP et ACD sont proportionnelles.

• On a l'égalité des trois rapports : $\frac{AB}{AC} = \frac{BP}{CD} = \frac{AP}{AD}$ On choisit : $\frac{AB}{AC} = \frac{BP}{CD}$ et on a :

$$\frac{1,8}{AC} = \frac{16 \times 10^{-3}}{L} \text{ d'où : } 1,8L = 16 \times 10^{-3} AC \text{ D'où finalement : } AC = \frac{1,8L}{16 \times 10^{-3}} = \frac{1,8 \times 10^3 L}{16} = \frac{1800}{16} L = \frac{900}{8} L = 112,5 L$$

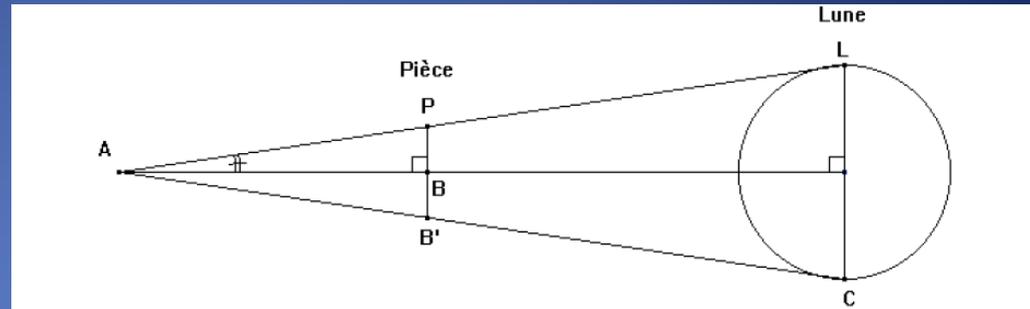
La distance Terre-Lune est de $\frac{900}{8} L$ soit 112,5 fois le diamètre de la Lune.



1.4.6 Angle du diamètre lunaire et calcul du rayon de la Lune par Aristarque de Samos (-310 à -230)

En reprenant la situation où l'on cache la Lune avec une pièce de monnaie, on a : $AB = 1,8 \text{ m}$ et $PB' = 16 \text{ mm}$.

De plus, on considère que : B milieu de $[PB']$ et que le triangle PAB est isocèle en A.



3a) Calculer une valeur de l'angle PAB et en déduire une valeur de l'angle lunaire LAC.

3b) Sachant que le cycle de la Lune est de 30 jours environ, en déduire le temps de parcours d'un diamètre de la Lune dans le ciel ?

3a) Dans le triangle PAB rectangle en B, on a : $\tan \widehat{PAB} = \frac{PB}{AB}$ soit encore : $\tan \widehat{PAB} = \frac{8 \times 10^{-3}}{1,8} \approx 4,44 \times 10^{-3}$

Ainsi, on obtient à l'aide de la calculatrice : $\widehat{PAB} = \tan^{-1}(4,44 \times 10^{-3}) \approx 0,252$ Finalement : $\widehat{LAC} = 2\widehat{PAB} \approx 0,504$

L'angle lunaire \widehat{LAC} est d'environ $0,5^\circ$ au dixième près

3b) Soit t le temps de parcours d'un diamètre de Lune dans le ciel, on utilise un tableau de proportionnalité suivant :

	Diamètre de Lune	Tour de la Terre
Temps de parcours en jours	t	30
Angle en degré	0,5	360

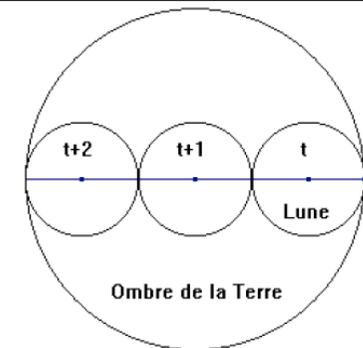
On obtient donc : $t = \frac{30 \times 0,5}{360} = \frac{3 \times 10 \times 0,5}{3 \times 12 \times 10} = \frac{0,5}{12} = \frac{1}{24}$ Le temps de parcours d'un diamètre lunaire est de $\frac{1}{24}$ de jour soit 1h.

3c) Lors d'une éclipse de Lune, d'une durée de deux heures, la Lune a donc bougé de deux diamètres lunaires (on considère que le début de l'éclipse commence et se fini lorsque les deux astres se « rencontrent »).

3d) La Lune bouge de deux diamètre lunaires, donc son diamètre rentre trois fois dans celui de la Terre ! Ainsi, la Lune est trois fois « plus petite » que la Terre du point de vue de son diamètre.

3e) Connaissant le rayon de la Terre, on obtient :

$R_{\text{Lune}} = \frac{R_{\text{Terre}}}{3} \approx \frac{6\,279}{3} \approx 2093$. Le rayon de la Lune est d'environ 2093 km.



La Lune se trouverait donc à 112,5 . 4186 km, soit 470 925 km. Pas si mal... Elle varie en réalité entre 356 370 et 406 710 km.

1.5 Définition de l'optique géométrique

L'*optique géométrique* est une branche de l'optique qui s'appuie principalement sur la notion de *rayon lumineux* pour décrire la *lumière*.

L'optique géométrique consiste à étudier la manière dont la lumière se propage en ne considérant que la marche des rayons lumineux.

Un rayon lumineux est une *notion théorique* : il n'a pas d'existence physique. Il sert de modèle de base à l'optique géométrique, où tout *faisceau de lumière est représenté par un ensemble de rayons lumineux*.

Premier principe général de l'optique géométrique : propagation rectiligne de la lumière :

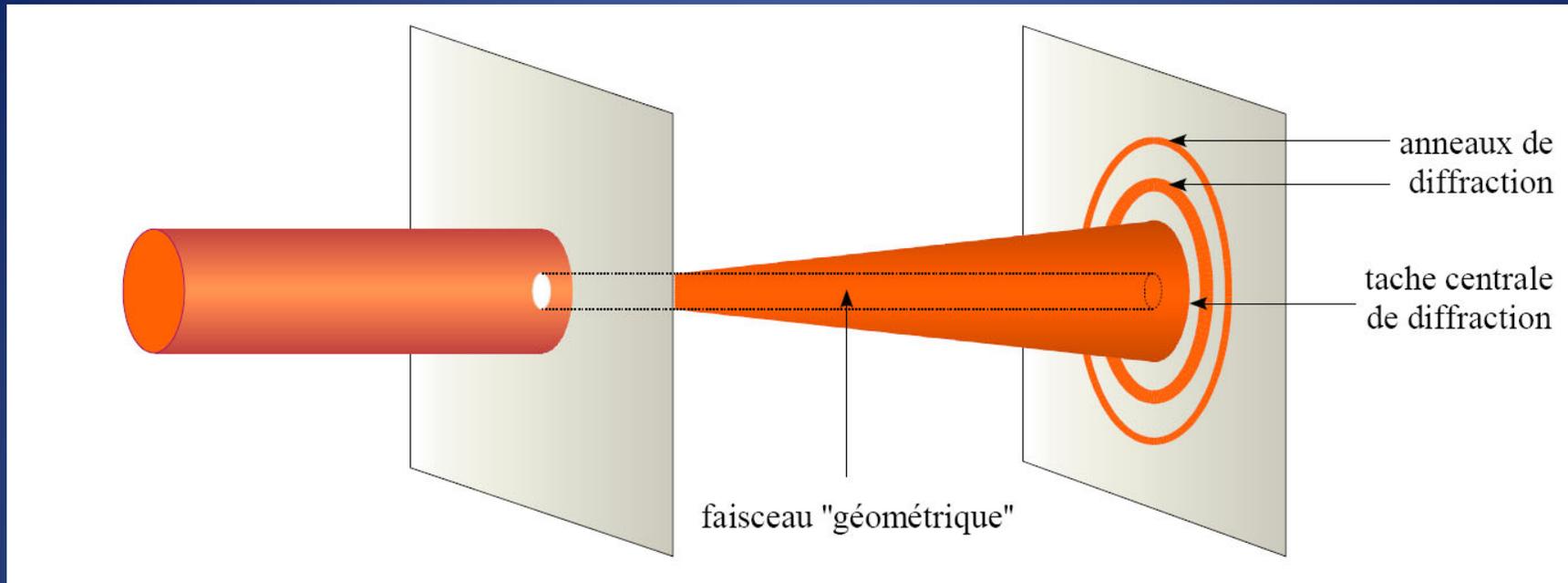
« Dans un milieu *transparent, homogène et isotrope*, la lumière se propage en *ligne droite* : les supports des rayons lumineux sont des droites ».

Rappelons qu'un *milieu* est dit :

- ✓ *transparent*, s'il laisse passer la lumière (par opposition à un milieu opaque) ;
- ✓ *homogène*, si ses caractéristiques optiques sont *indépendantes de l'espace* c'est-à-dire *identiques en tout point de l'espace* ;
- ✓ *isotrope*, si ses caractéristiques optiques sont *indépendantes de la direction* selon laquelle se propage le rayon lumineux.

L'eau, l'air, le vide, les verres sont en général des milieux transparents, homogènes et isotropes, pour certaines longueurs d'ondes tout au moins.

1.6 Validité de l'optique géométrique



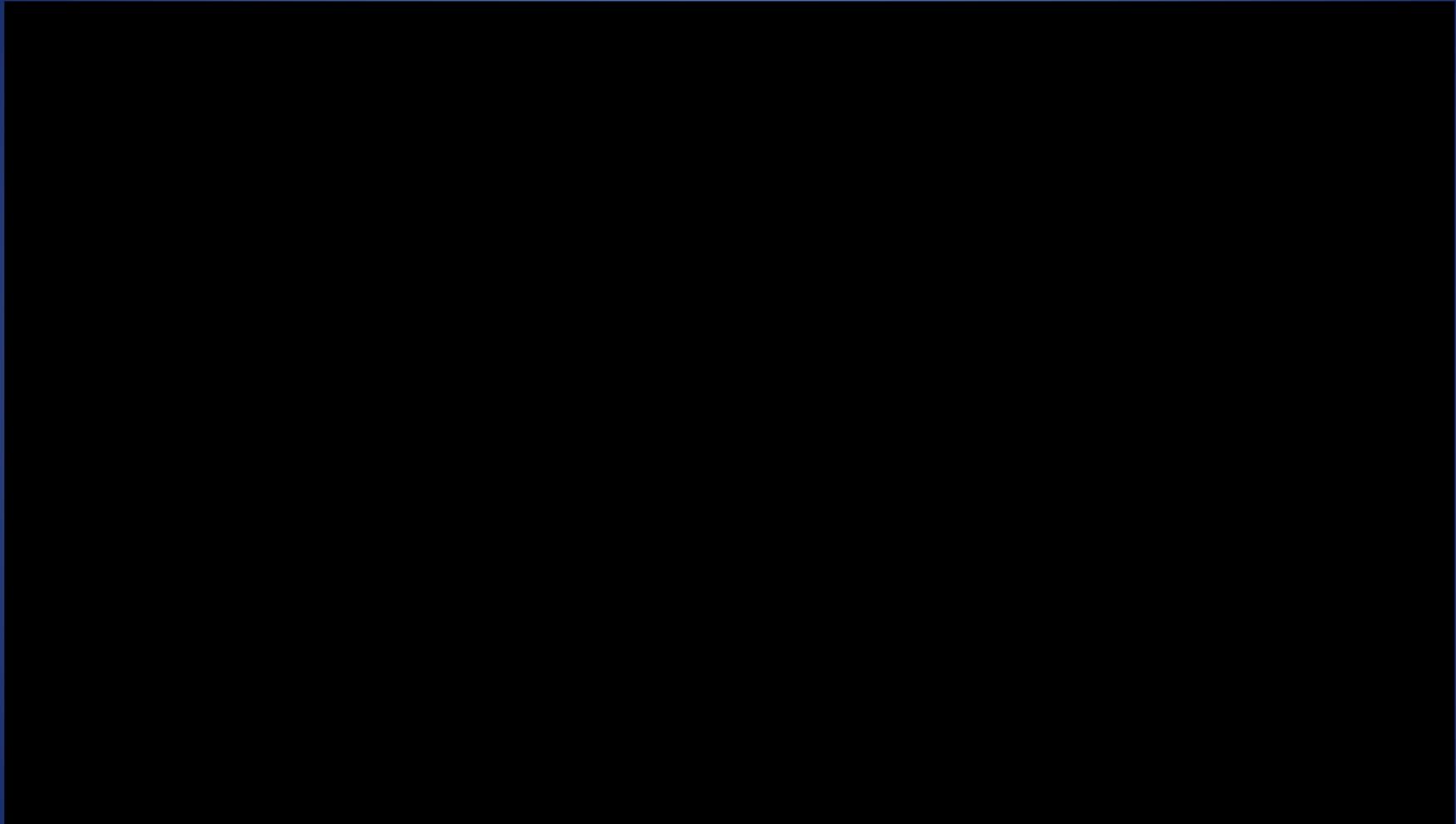
Lorsqu'un faisceau lumineux traverse une ouverture étroite, on peut observer la présence de lumière en dehors de la zone définie par la loi de propagation rectiligne : on dit qu'il y a *diffraction de la lumière*.

La diffraction est négligeable si la longueur d'onde de la radiation utilisée reste faible par rapport aux dimensions de l'ouverture.

Les lois de l'optique géométrique sont donc valables pour des longueurs d'onde quasiment « nulles ».

Condition d'application de l'Optique géométrique :
Si $\lambda \ll d$, alors l'approximation de l'optique géométrique est valable.

Diffraction d'un faisceau laser rouge



<http://www.youtube.com/watch?v=vdJydvC7Lol>

Outil de description de la lumière: Ondes, Photons ou Rayons Lumineux selon le contexte considéré.

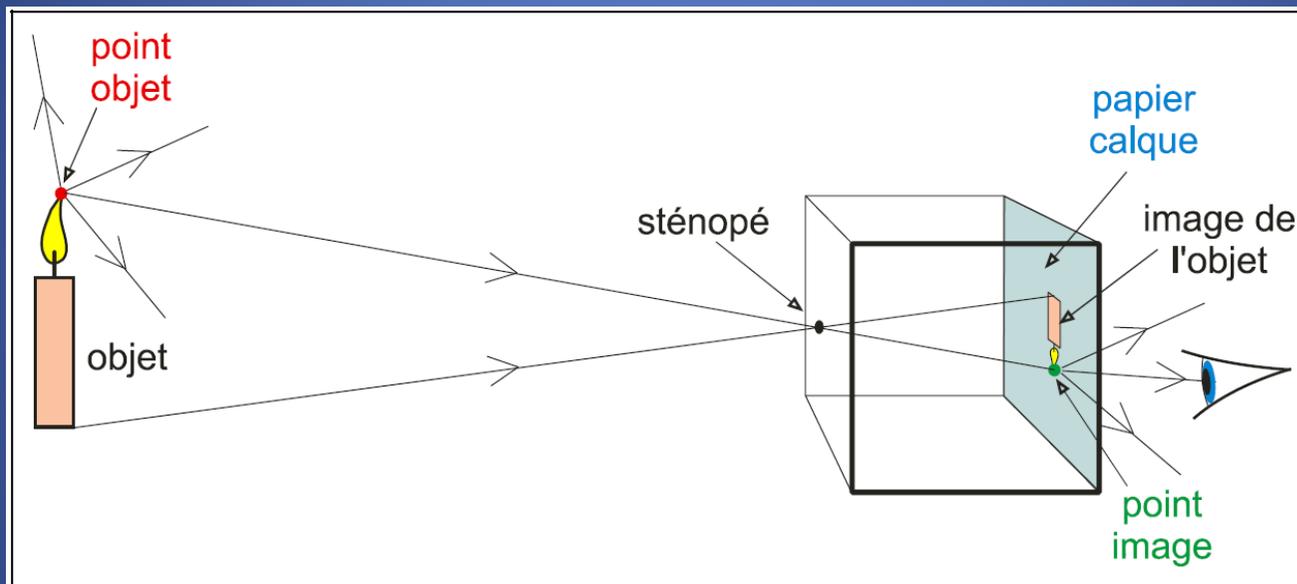
Description: elle dépend de la dimension DO des objets par rapport à λ :

	$DO \gg \lambda$	$DO \approx \lambda$	$DO \ll \lambda$
<i>Description</i>	<i>Rayon</i>	<i>Onde</i>	<i>Photon</i>
<i>Application</i>	<i>Formation des images</i>	<i>Interférence - diffraction</i>	<i>Effet photoélectrique</i>
<i>Apparition</i>	<i>17^{ème} siècle</i>	<i>19^{ème} siècle</i>	<i>20^{ème} siècle</i>

1.7 Une première application à la photographie : observation avec une chambre noire

Une *chambre noire* (*camera obscura*) est une boîte fermée. D'un côté un *petit trou* (appelé *sténopé*) laisse entrer la lumière. Le côté opposé constitué d'une *feuille de papier calque translucide* sert d'écran d'observation. Afin de réaliser une relative obscurité au voisinage de l'écran d'observation, une visière à l'aide d'un carton noir peut être appliquée.

Observons le monde extérieur à travers cette chambre noire : *sur l'écran translucide nous apercevons une image colorée, peu lumineuse, renversée et assez floue.*



Interprétation :

Tout point lumineux des objets placés devant la chambre noire *émet des rayons lumineux dans toutes les directions*. Parmi ces rayons, *il y en a un qui traverse le trou*, en ligne droite, et frappe l'écran translucide en donnant lieu à un *point image*. Celui diffuse partiellement la lumière reçue de sorte que finalement un rayon entre dans l'œil de l'observateur.

Interprétation :

Chaque point de la source émet des rayons dans toutes les directions. Les rayons qui traversent le trou frappent l'écran.

Les rayons issus de A donnent l'image A' , ceux issus de B donnent B' (figure 1.5).

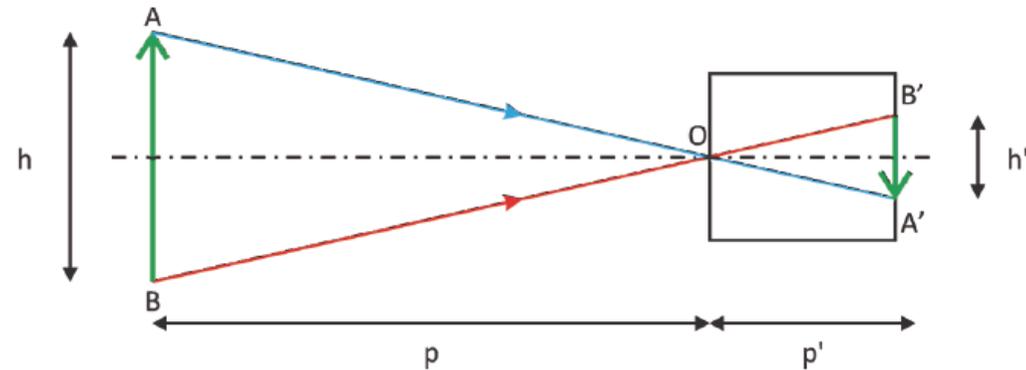


FIGURE 1.5 – Principe de fonctionnement d'une chambre noire

Avec :

- p distance entre l'objet et le trou
- p' distance entre l'image et le trou
- h hauteur de l'objet
- h' hauteur de l'image

Si on éloigne l'objet, l'image devient plus petite : $p \nearrow \Rightarrow h' \searrow$.

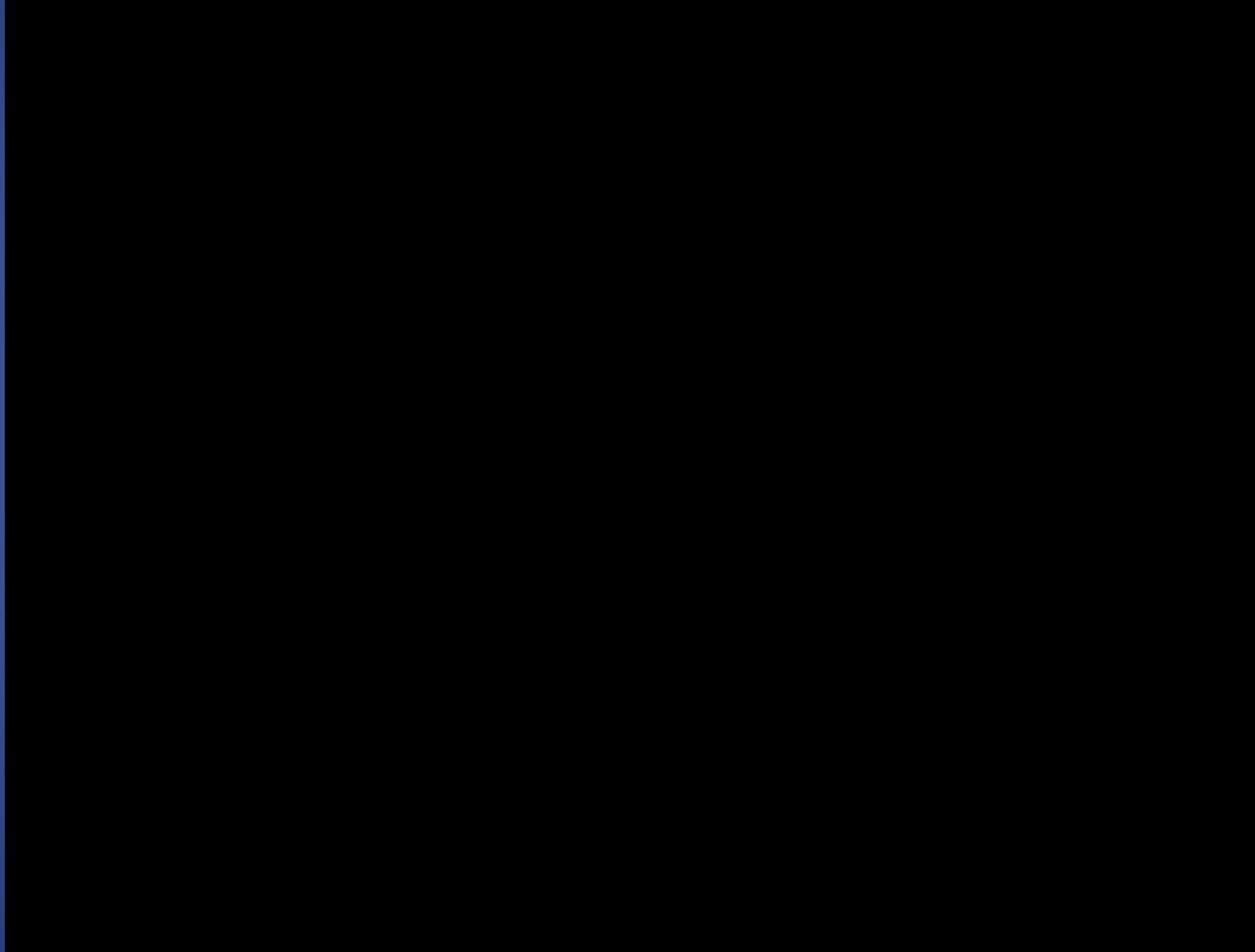
Si on éloigne l'écran, l'image devient plus grande : $p' \nearrow \Rightarrow h' \nearrow$.

Les triangles ABO et $A'B'O$ étant semblables, le grandissement γ s'écrit :

$$\gamma = \frac{h'}{h} = \frac{p'}{p}.$$

En augmentant la taille du trou, l'image devient plus lumineuse mais moins nette : le faisceau lumineux issu d'un point donnera un petit disque sur l'écran.

Réalisation d'une camera obscura



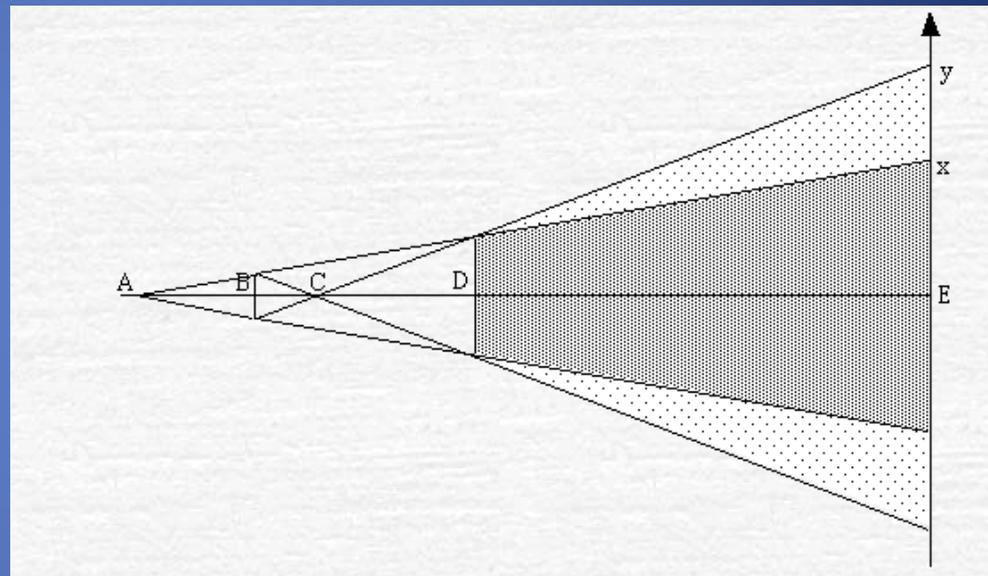
<http://www.youtube.com/watch?v=pOKgSIAOdhI>



1.8 Exercices (propagation rectiligne)

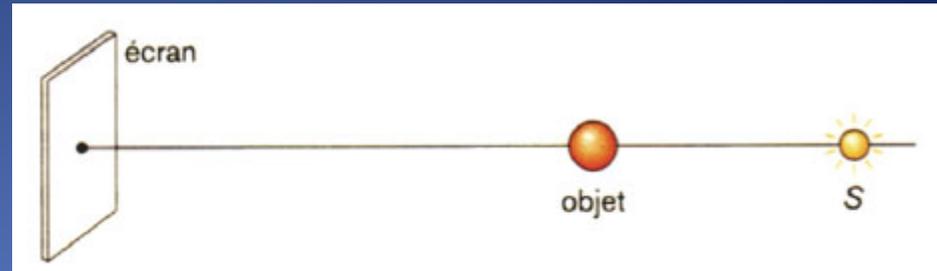
1. Une source ponctuelle est placée devant un écran. On interpose, entre la source et l'écran, un cache opaque circulaire de diamètre 5cm. Le cache est parallèle à l'écran et la source est placée sur l'axe de révolution du cache. La distance entre la source et le cache est égale à 1m et celle entre le cache et l'écran est égale à 2m. Calculer la surface de l'ombre sur l'écran. (*Rép.* L'ombre est un disque de 176,7 cm²).

2. Une source de lumière en forme de disque, placée en B, de rayon $r_1=5$ mm éclaire un disque opaque de même axe, de rayon $r_2=5$ cm, placé en D, à $BD=50$ cm de la source. Calculer les largeurs de l'ombre portée et de la pénombre sur un écran parallèle aux disques et situé en E, à une distance $DE = 2$ m du disque opaque. (*Rép.* L'ombre est un disque de 46 cm de diamètre, la pénombre une couronne de 4 cm de largeur)



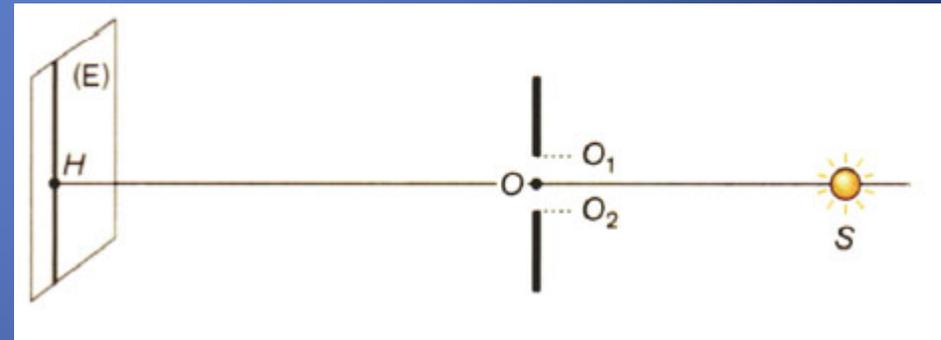
3. Une chambre noire est une boîte de 25 cm de profondeur, percée d'un petit trou sur sa face avant et d'un calque sur sa face arrière. On observe la lumière provenant d'un immeuble de 30 m de haut, situé à 50 m en avant de la chambre noire arrivant sur le calque après avoir traversé le petit trou. Calculer la hauteur de l'immeuble observé sur le calque. (*Rép.* 15 cm).

4. On considère une source ponctuelle S , une petite sphère de rayon $r = 2\text{cm}$ et un écran placé à la distance $D = 2,0\text{m}$ de la source S . La sphère est placée à la distance $d = 0,5\text{m}$ de la source ponctuelle de telle façon que l'on puisse voir son ombre portée sur l'écran. La source S et les centres de l'écran et de la sphère sont alignés.



- ✓ Quelle est la nature géométrique de l'ombre portée sur l'écran ?
- ✓ Évaluer les dimensions de cette ombre portée, ainsi que sa surface.
- ✓ On remplace la sphère par un disque de même rayon, à quelles conditions peut-on obtenir sur l'écran la même ombre portée qu'avec la sphère ?

5. Une fente de largeur $O_1O_2 = 5,0\text{ cm}$ est éclairée par une source lumineuse S supposée ponctuelle placée à la distance $d_1 = OS = 20\text{cm}$ (O est le milieu de la fente). On place un écran (E) à la distance $d_2 = OH = 60\text{cm}$. Le point H appartenant à l'écran est tel que les points S , O et H sont alignés. Quelle est la largeur d'écran éclairée par la source ?



6. Soient deux sources ponctuelles S_1 et S_2 situées dans un plan vertical à la distance $D = 3,00\text{m}$ d'un écran déroulé verticalement. On dispose à la distance $d = 30\text{cm}$ des deux sources, un petit objet opaque de forme rectangulaire $a = 3,0\text{ cm}$ et $b = 2,0\text{ cm}$, le côté le plus long étant disposé verticalement. Les deux sources lumineuses distantes de $3,0\text{ cm}$ sont disposées symétriquement par rapport à la direction horizontale passant par le milieu O du rectangle.

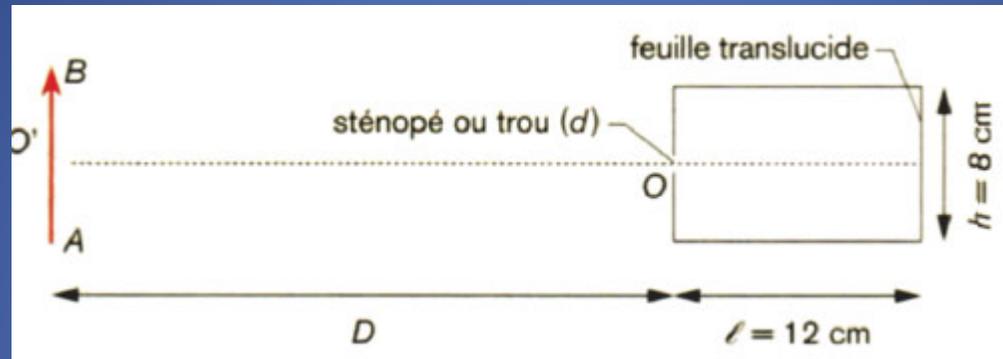


- ✓ Faire un schéma dans un plan vertical contenant S_1 , S_2 et O et en utilisant la propagation rectiligne de la lumière, montrer l'existence d'une (ou des) zone(s) d'ombre et d'une (ou des) zone(s) de pénombre.
- ✓ Ces zones sont rectangulaires. En utilisant une vue de dessus, c'est-à-dire dans un plan horizontal contenant O , déterminer la largeur commune des zones précédemment définies.
- ✓ À partir des 2 schémas en déduire les dimensions de la zone d'ombre et déterminer sa surface.
- ✓ En utilisant le schéma dans le plan vertical et le théorème de Thalès, montrer que la hauteur H de la zone d'ombre et de pénombre est donnée par la relation :

$$H = a \frac{D - d/2}{d/2}$$

- ✓ En déduire la surface des zones de pénombre et préciser le nombre de zones de pénombre et leurs dimensions.

7. À partir d'une boîte parallélépipédique, Julien construit une chambre noire. Puis il place face au trou (noté O) de diamètre $d = 1,0\text{mm}$ un filament lumineux rectiligne AB de hauteur $10,0\text{ cm}$ (O' milieu de AB) et d'épaisseur négligeable. Le filament est disposé parallèlement à la face translucide, sa distance au trou O est $D = 60,0\text{ cm}$.



- ✓ En considérant le trou O ponctuel et en utilisant des rayons lumineux issus de A et B, montrer que l'œil de Julien placé derrière la feuille translucide voit une reproduction du filament renversée sur la feuille (on parlera d'image $A'B'$), puis déterminer la taille de l'image $A'B'$.
- ✓ Montrer sur un schéma en vue du dessus avec deux rayons issus de O' que le diamètre du trou influe sur la netteté de l'image. Établir la relation qui lie la largeur e de l'image à la distance D et aux caractéristiques de la chambre noire (l et d) puis calculer e.

2 Phénomènes de diffusion, de réflexion et de réfraction : lois de Snell et Descartes

2.1 Diffusion et réflexion

Expérience : on envoie un faisceau laser rouge sur une feuille de papier blanc et on place un petit objet au voisinage de la feuille, en dehors du faisceau incident (figure 1.7). Puis on remplace la feuille de papier par un miroir (figure 1.8).



FIGURE 1.7 – Laser sur feuille de papier



FIGURE 1.8 – Laser sur miroir

Observations :

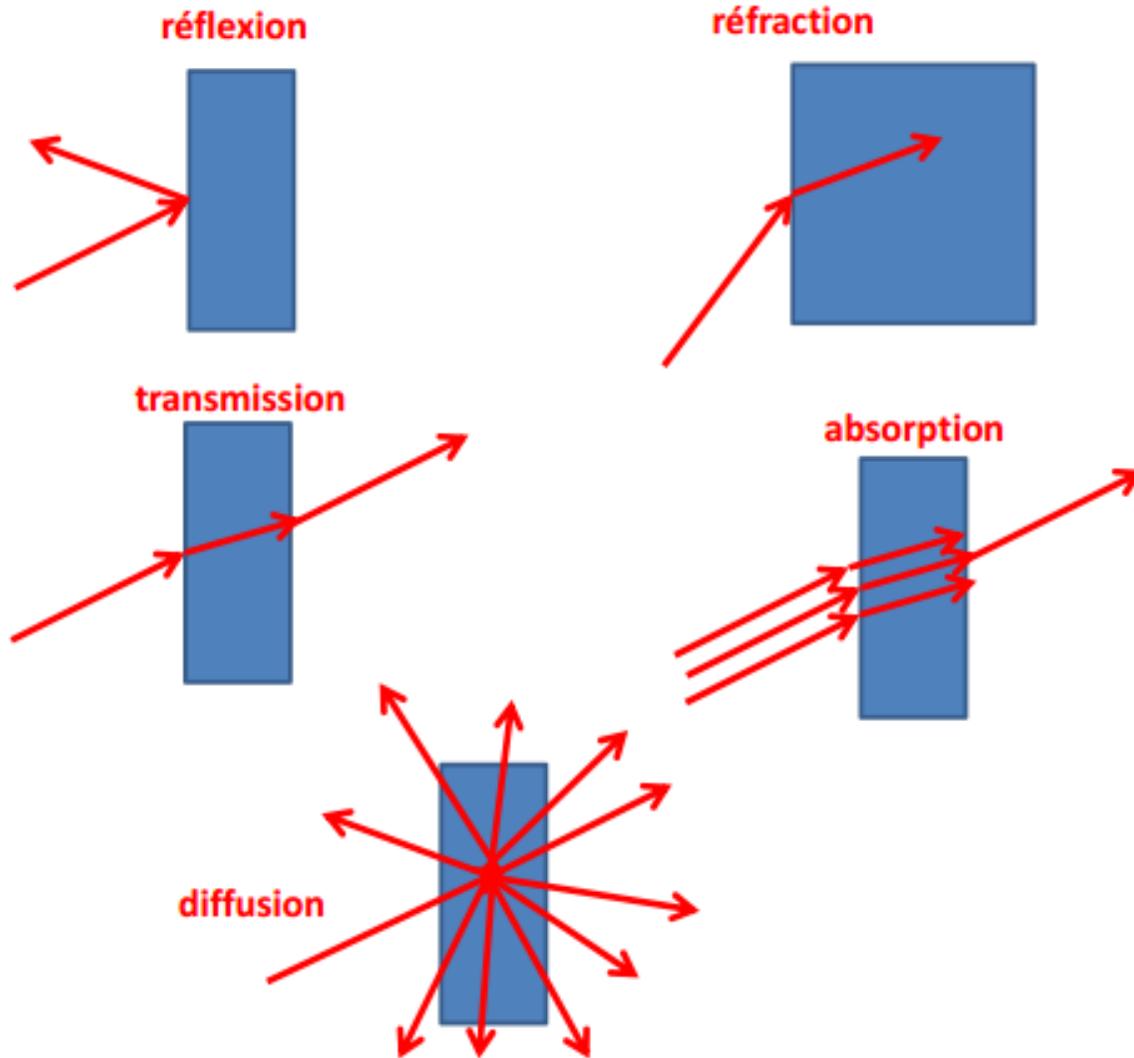
- ✓ *L'objet placé au voisinage de la feuille de papier est éclairé en rouge.*
- ✓ *Lorsqu'on remplace la feuille de papier par le miroir, l'objet n'est plus éclairé.*

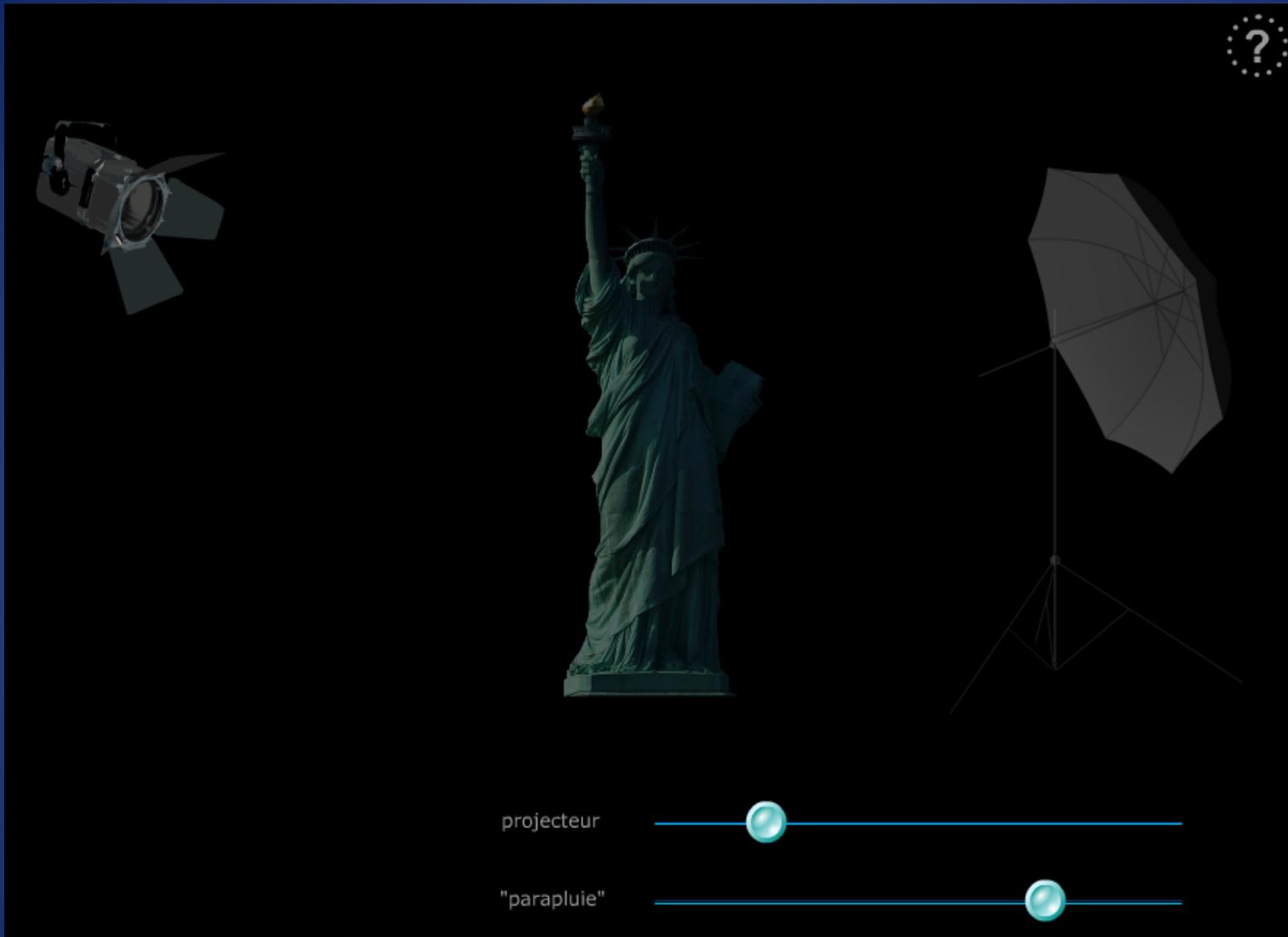
Interprétation :

La *feuille* renvoie la lumière *dans toutes les directions* : *elle diffuse la lumière.*

La *surface du miroir* renvoie la lumière *dans une seule direction*, *elle réfléchit la lumière.*

Interaction lumière-matière





[Fichier en local](#)

http://physiquecollege.free.fr/physique_chimie_college_lycee/cinquieme/optique/source_primaire_secondaire.htm



2.2 Définitions

On appelle *dioptr*e la *surface séparant deux milieux transparents*, d'indices de réfraction différents.

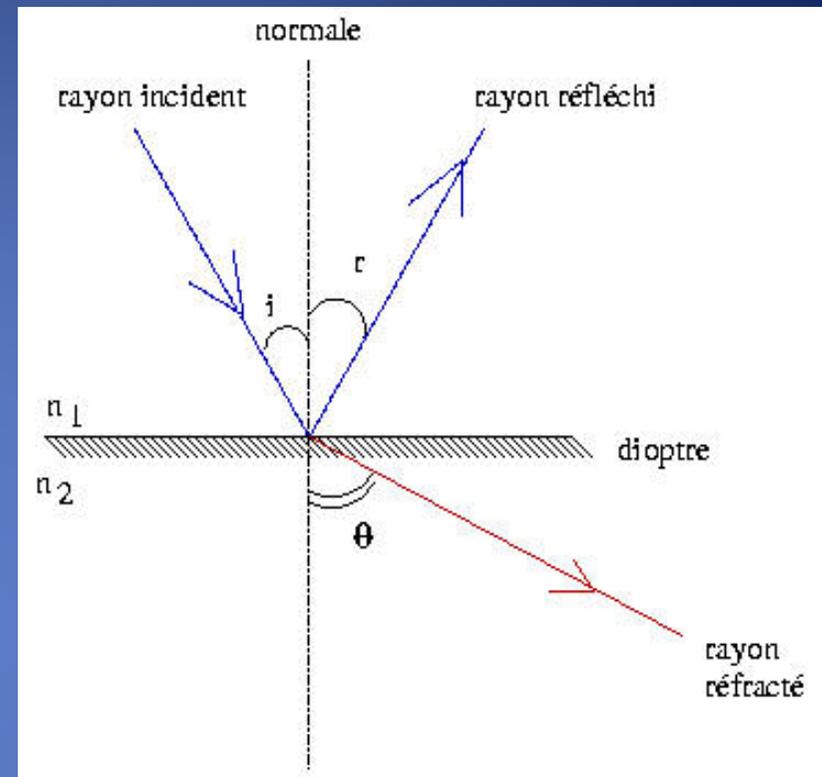
Si les rayons demeurent *rectilignes dans un milieu homogène et isotrope*, on remarque qu'ils sont *déviés lors du franchissement d'un dioptr*e ou à la *rencontre d'une surface réfléchissante (miroir)*.

Les changements de direction aux interfaces correspondent aux phénomènes de *réflexion* et de *réfraction*.

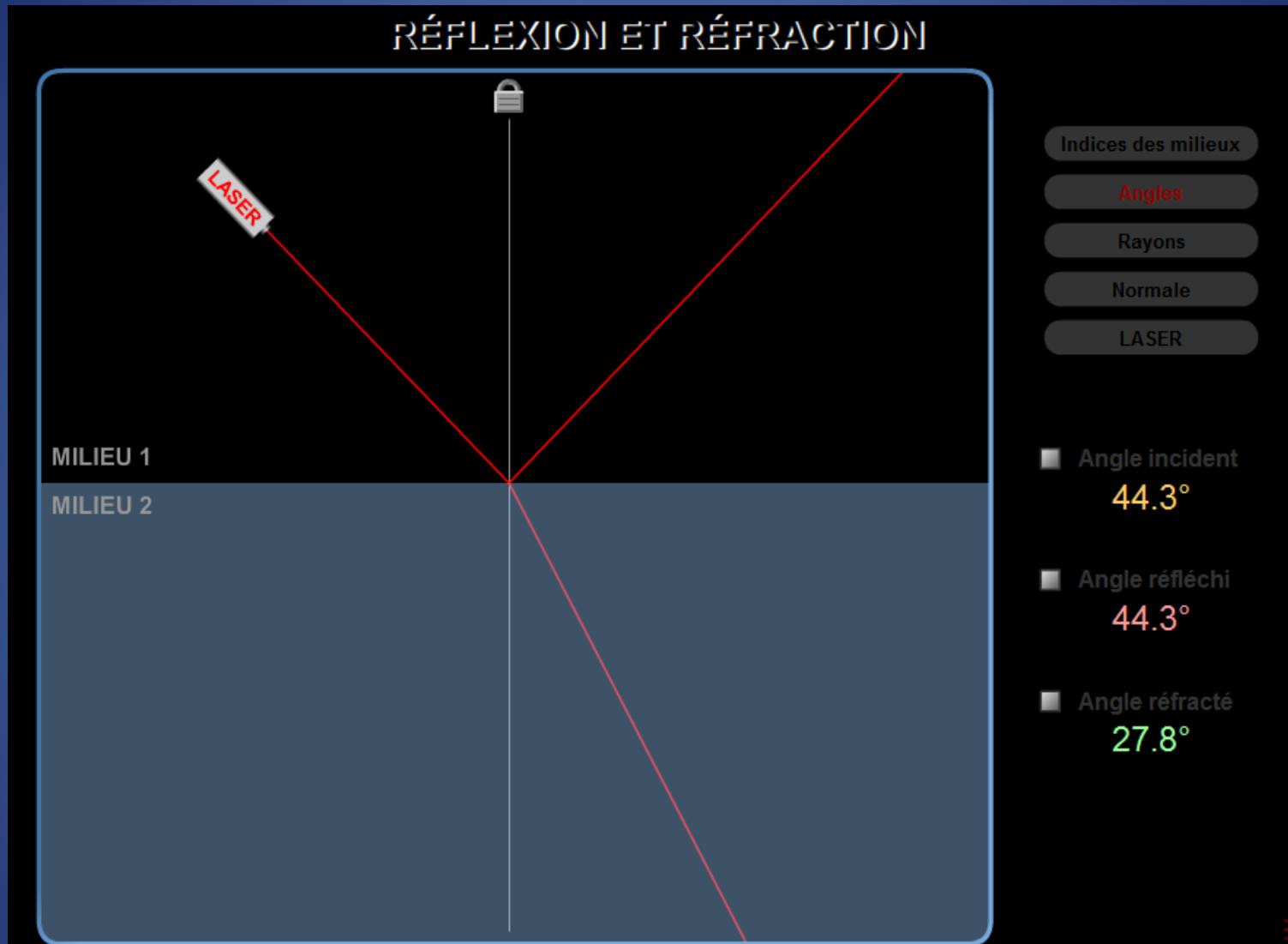
✓ La *réflexion* caractérise un *changement de direction du rayon sur une surface frontière, mais sans changement de milieu* (le rayon incident et le rayon réfléchi voyagent dans le même milieu) ;

✓ la *réfraction* correspond à la *dévi*ation d'un rayon lors de la traversée de la frontière entre *deux milieux* (le rayon incident et le rayon réfractés parcourent des milieux différents).

Ces phénomènes se produisent en général *simultanément*, même s'ils sont étudiés dans la suite séparément.



Réflexion et réfraction, lois de Descartes



[Applet en local](#)

http://www.ostralo.net/3_animations/swf/descartes.swf

Expérience : on dirige un rayon laser obliquement vers la surface réfléchissante d'un miroir horizontal. Les faisceaux incident et réfléchi sont visualisés par la vapeur (figure 1.10).

Observation : les faisceaux incident et réfléchi sont dans un plan perpendiculaire au miroir.

Expérience : on place un rapporteur dans un plan perpendiculaire à un miroir (figure 1.11).

Observation : l'angle de réflexion r et l'angle d'incidence i ont même amplitude.

Ces résultats constituent les *lois de Descartes de la réflexion*.

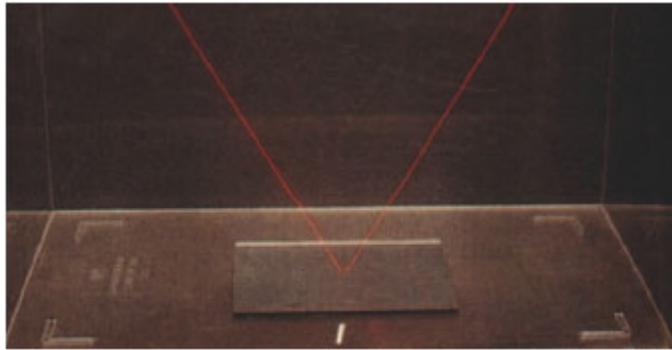


FIGURE 1.10 – Plan contenant les rayons

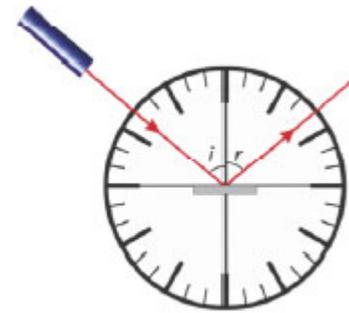
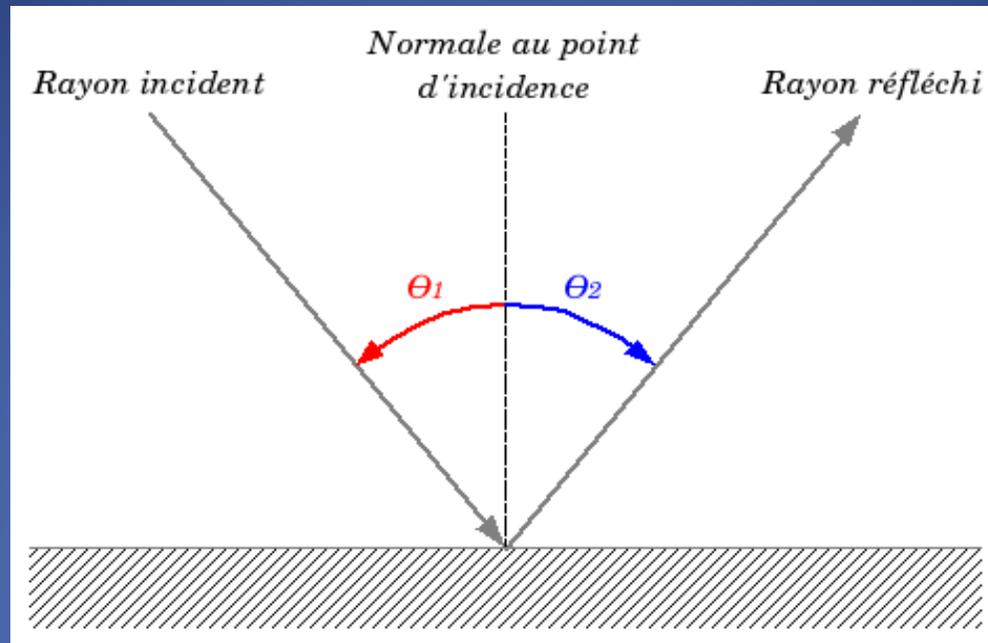


FIGURE 1.11 – Mesure des angles

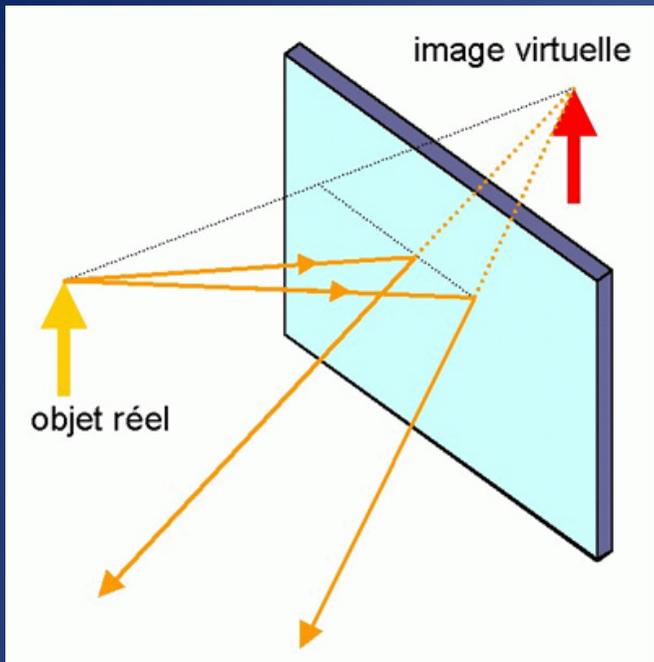
2.3 Lois de la réflexion



- ✓ le rayon incident, la normale au point d'incidence et le rayon réfléchi sont coplanaires ;
- ✓ l'angle de réflexion (angle entre la normale et le rayon réfléchi) est égal à l'angle d'incidence (angle entre la normale et le rayon incident), au signe près :

$$|\theta_1| = |\theta_2|$$

- ✓ Si l'on inverse le sens de parcours de la lumière, la direction des rayons reste inchangée (*principe de retour inverse de la lumière*).





[E:\Dropbox\Cours Helb\Cours B1 Image\Le miroir fidèle Physique à Main Levée.mp4](http://phymain.unisciel.fr/le-miroir-fidele/)
<http://phymain.unisciel.fr/le-miroir-fidele/>

A l'aide de deux poupées, *on explique pourquoi un miroir plan inverse le côté droit et le côté gauche des images* qu'il donne, *et comment faire pour obtenir un système réfléchissant qui respecte la symétrie gauche-droite* des objets.

2.4 Exercices (lois de la réflexion)

1. Un point lumineux S est placé à 40 cm au dessus et sur la normale au centre d'un miroir plan circulaire de diamètre $d=10$ cm, disposé horizontalement.

✓ Le miroir étant à 2 m du plafond, calculer le diamètre D du cercle éclairé au plafond par la lumière réfléchi sur le miroir.

Aide : construisez le point S' , image de S par le miroir.

✓ Que devient le cercle éclairé au plafond si on déplace le miroir latéralement par rapport à la source de lumière ? (*Rép.* 60 cm de diamètre, dans tous les cas)

2. L'œil ponctuel d'un observateur est placé devant un miroir plan circulaire de 5 cm de rayon, sur la normale à ce miroir qui passe par son centre, et à 20 cm de ce centre. Quelle portion verra-t-il, par réflexion, d'un mur placé derrière lui, parallèlement au miroir, à 1,8m de ce miroir ? (On considère que la tête de l'observateur ne gêne pas les observations). (*Rép.* Disque de 50 cm de rayon, centré sur la normale du miroir).

3. Une personne d'une hauteur de 1,80 m se regarde dans un miroir plan vertical. Les yeux sont à 10cm du sommet de la tête.

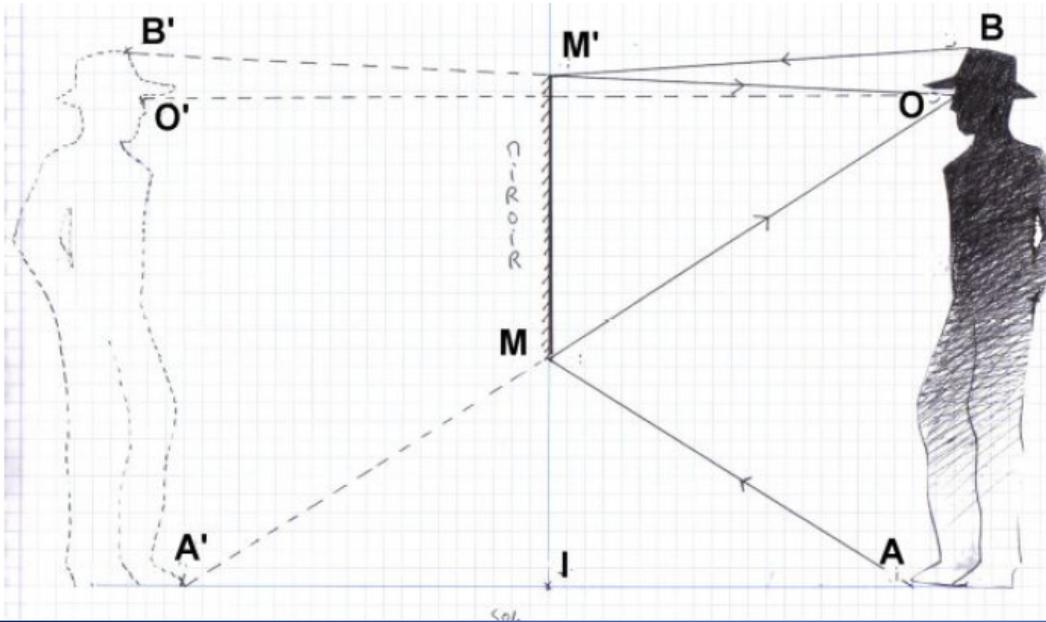
✓ Quelles doivent être la dimension minimale du miroir et la distance au sol du miroir pour que l'observateur se voie tout entier ?

✓ Montrez que ces résultats sont indépendants de la position de l'observateur par rapport au miroir (On considère l'observateur vertical et sans épaisseur).

(*Rép.* Miroir de 90 cm, situé à 85 cm du sol)

Résolution générale du problème « se voir en entier dans le miroir »

Un homme de hauteur AB se regarde dans un miroir placé à la distance AI ; son œil est à la distance AO du sol.
 Quelle est la hauteur MM' du miroir et à quelle distance du sol IM doit-on le placer pour se voir en entier ?



➤ Propriété de Thalès dans $A'O'B'$: $\frac{OM}{OA'} = \frac{OM'}{OB'} = \frac{MM'}{A'B'} \Rightarrow MM' = \frac{OM'}{OB'} \times A'B'$ (1)

➤ Propriété de Thalès dans $O'O'B'$: $\frac{OH}{OO'} = \frac{OM'}{OB'}$

Or O' est le symétrique de O par rapport à H , donc : $\frac{OH}{OO'} = \frac{1}{2}$ donc $\frac{OM'}{OB'} = \frac{1}{2}$ (2)

➤ D'où, en reportant dans (1) et (2) : $\frac{MM'}{A'B'} = \frac{1}{2} \Rightarrow MM' = \frac{A'B'}{2}$

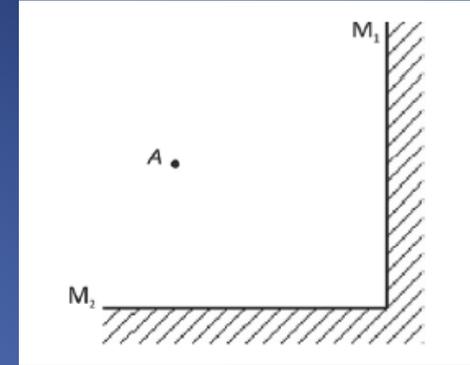
➤ Propriété de Thalès dans $A'O'B'$: $\frac{A'M}{A'O} = \frac{A'I}{A'A} = \frac{MI}{OA} \Rightarrow IM = \frac{A'I}{A'A} \times OA$

Or A' est le symétrique de A par rapport à I , donc : $\frac{A'I}{A'A} = \frac{1}{2}$ donc $IM = \frac{OA}{2}$

Taille minimale du miroir = $\frac{\text{taille individu}}{2}$
 Hauteur minimale du miroir par rapport au sol = $\frac{\text{distance oeil-pied}}{2}$

(ces résultats ne dépendent pas de la distance de l'homme au miroir)

4. Étudions les images d'un point-objet A données par deux miroirs plans placés orthogonalement l'un par rapport à l'autre.



- ✓ Positionner d'abord l'image A1 de A donnée par le miroir (M1), puis l'image A2 de A donnée par le miroir (M2). Ces deux images sont dites images premières. À l'aide d'un rayon lumineux issu de A, se réfléchissant uniquement sur (M1), positionner l'œil de l'observateur qui voit l'image première A1. Utiliser la même démarche pour l'autre image première.
- ✓ Positionner ensuite la (ou les) images secondes (images des images premières dans le miroir). Pour rechercher ces images il suffit de prolonger par des lignes discontinues les 2 miroirs : A1 présente une image A1' et A2 une image A2'. Pourquoi dans cet exercice les images A1' et A2' sont-elles confondues ? À l'aide d'un rayon lumineux issu de A, se réfléchissant sur (M1), puis sur (M2), positionner l'œil de l'observateur qui voit les images secondes A1' et A2'.

2.5 Phénomène de réfraction, introduction

Expérience : dirigeons un faisceau laser obliquement vers la surface de l'eau contenue dans une cuve aux parois transparentes (figure 1.15).

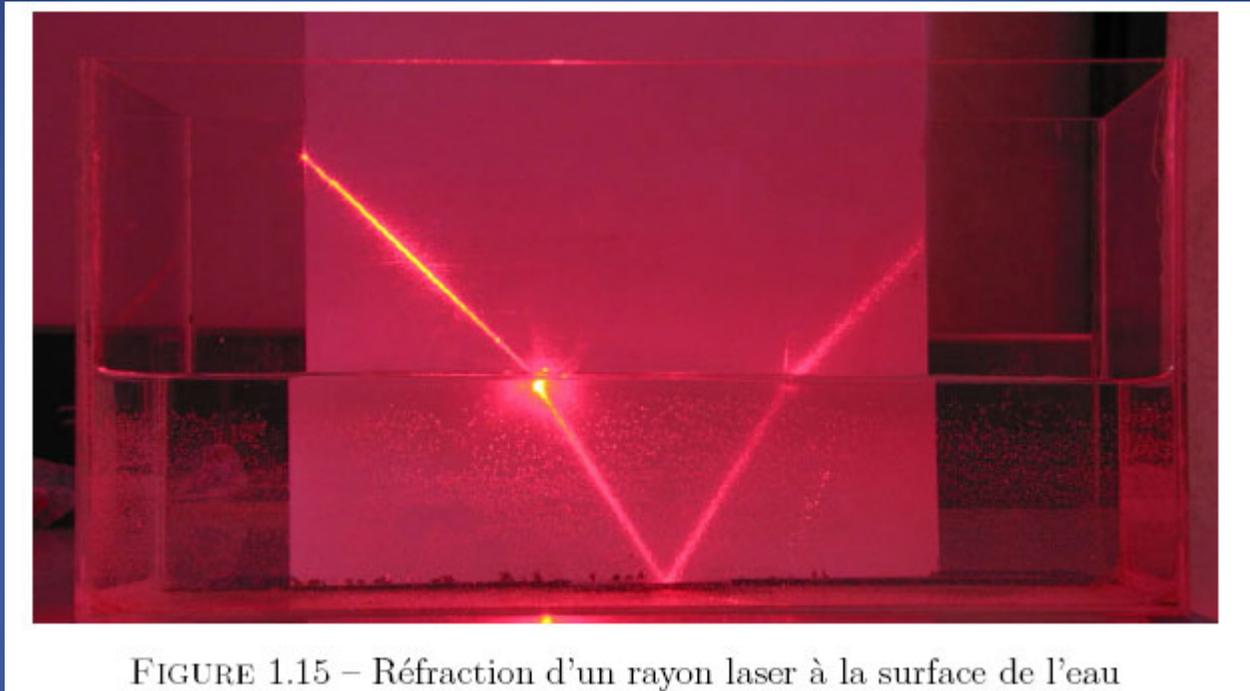
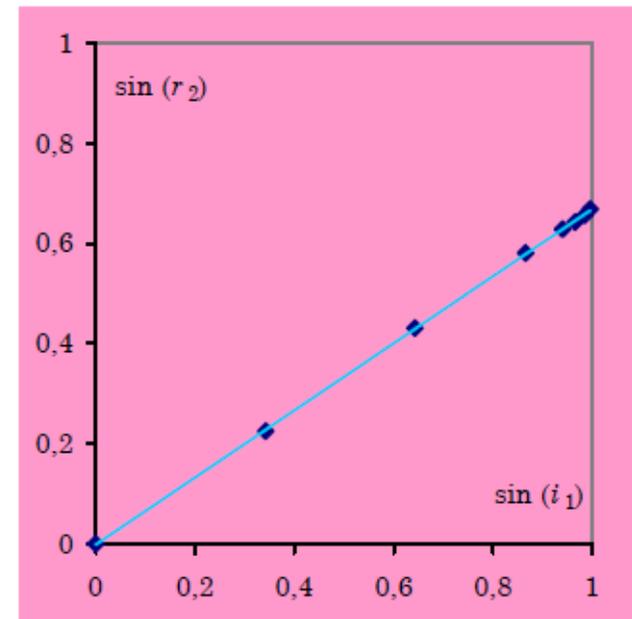
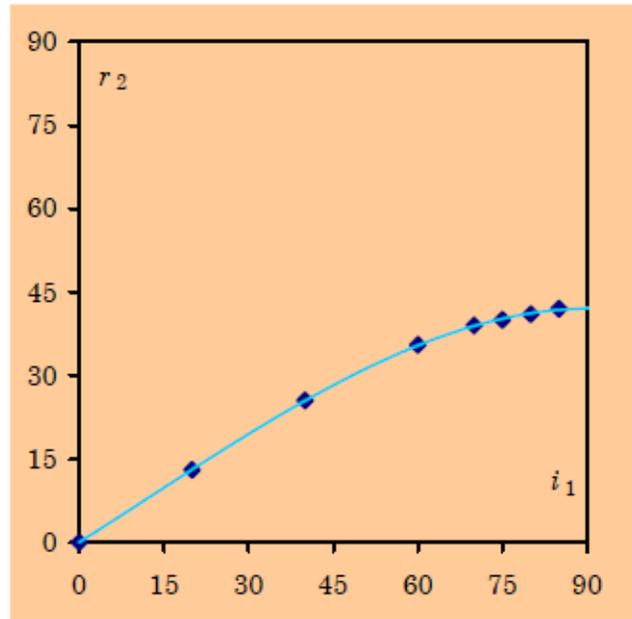


FIGURE 1.15 – Réfraction d'un rayon laser à la surface de l'eau

Observation : le faisceau lumineux est dévié en traversant la surface de séparation entre les deux milieux transparents.

c) Il n'y a pas de proportionnalité entre l'angle d'incidence et l'angle de réfraction ; un graphique de r_2 en fonction de i_1 montre que ces angles sont liés par une *relation non linéaire* (ci-dessous à gauche). Cependant, un graphique de $\sin(r_2)$ en fonction de $\sin(i_1)$ fait apparaître une relation linéaire (ci-dessous à droite). On note aussi dans le tableau ci-dessus que le quotient des sinus prend toujours pratiquement la même valeur, quel que soit l'angle d'incidence.



Conclusions :

- Il n'y a pas de réfraction si la lumière incidente vient perpendiculairement au dioptré.
- Sauf pour $i_1 = 0$, l'angle de réfraction est plus petit que l'angle d'incidence : le rayon réfracté se rapproche de la normale.
- La réfraction est d'autant plus prononcée que l'angle d'incidence est plus grand.
- L'angle de réfraction limite vaut : $L = \dots\dots^\circ$
- Le rayon réfracté se trouve dans le plan d'incidence.
- Nous constatons :

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} \simeq 1,5 = \text{constante.}$$

Il y a donc proportionnalité entre les sinus des angles d'incidence et de réfraction. Le coefficient de proportionnalité est noté $n_{\text{plexiglas/air}}$ et s'appelle *indice de réfraction* du plexiglas par rapport à l'air. Cet indice dépend des deux milieux transparents et est d'autant plus grand que la réfraction est, pour un même angle d'incidence, plus prononcée.



Reprenons l'expérience précédente mais *invertissons le sens de propagation de la lumière*. La lumière passe donc d'un milieu plus réfringent dans un milieu moins réfringent.

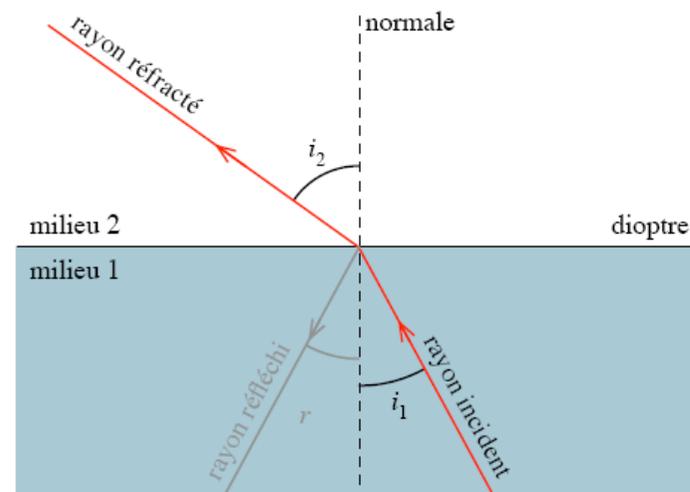


FIGURE 1.17 – Passage d'un rayon du plexiglas dans l'air

Choisissons comme valeurs de l'angle d'incidence successivement les valeurs de l'angle de réfraction de l'expérience 1.10.

Tableau des mesures :

i_1 ($^\circ$)										
i_2 ($^\circ$)										

Observation : les angles de réfraction respectifs sont égaux aux angles d'incidence de l'expérience 1.10.

Conclusions :

- La lumière emprunte la même trajectoire indépendamment du sens de la propagation. C'est la loi du retour inverse de la lumière.
- Sauf pour $i_1 = 0$, l'angle de réfraction est plus grand que l'angle d'incidence : le rayon réfracté s'éloigne de la normale.
- Si $i_1 = L$, angle de réfraction limite, alors $i_2 = 90^\circ$ (figure 1.18).
- Si $i_1 > L$ le rayon incident ne peut plus passer dans le milieu le moins réfringent : la lumière est *totalelement réfléchie*, le dioptre agit comme un miroir (figure 1.19).

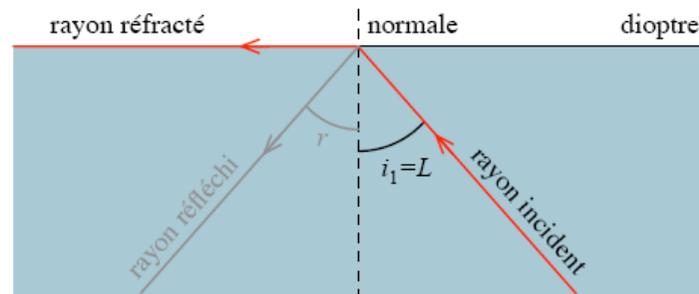


FIGURE 1.18 – Cas limite

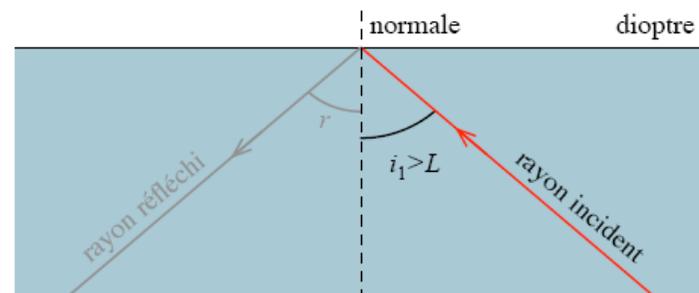


FIGURE 1.19 – Réflexion totale

- Nous constatons :

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} \simeq 0,667 = n_{\text{air/plexiglas}}$$

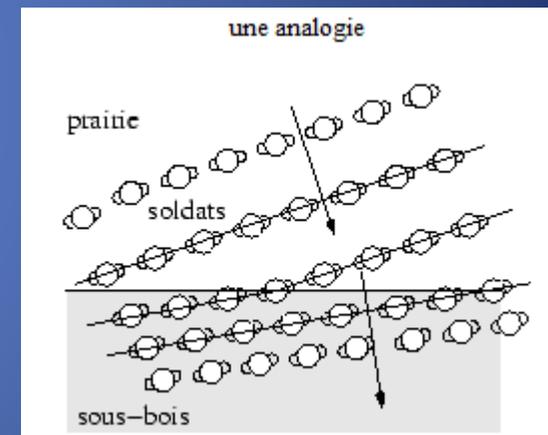
Le *phénomène de réfraction* est une *conséquence du fait que la vitesse de propagation de la lumière est différente dans des milieux transparents différents.*

On peut comprendre simplement l'origine du phénomène (changement de direction de la lumière au passage du dioptré) par une *analogie*. Considérons un *bataillon de soldats bien alignés* sur quelques dizaines de rangées, comme on pouvait en voir sur les champs de batailles du XIX^e siècle. Chacun de ses soldats, par peur où courageusement, applique la règle d'or du bon soldat : obéir aux ordres qui sont de *marcher en ligne droite devant lui à vitesse constante.*

Au départ son mouvement est aisé. Il marche *en rase campagne* dans la prairie. Le front du bataillon est bien rectiligne.

Mais voilà que son déplacement le mène directement vers la *lisière d'une forêt qu'il aborde avec un certain angle, de biais.* Comme la progression à travers les bois se trouve être *moins aisée que dans la prairie*, le premier homme qui parvient à la lisière de la forêt voit sa vitesse de progression diminuer.

Quelques instants plus tard, c'est le second homme qui ralentit. Puis de proche en proche les suivants ralentissent aussi. Le front se casse donc puisque les soldats qui sont encore dans la prairie progressent encore rapidement. Pourtant, chaque soldat continue d'appliquer les ordres : progresser tout droit devant lui. Mais *le fait que la vitesse de certains ait diminuée produit un changement de la direction du front de soldat, comme on peut le voir sur la figure suivante.*



Clairement, *la direction de déplacement du front de soldats est déviée vers la normale à la lisière de la forêt*, ce qui est compatible avec les expériences de déviation d'un faisceau lumineux qui passe d'un milieu peu dense (comme l'air) à un milieu plus dense (comme l'eau).

On montre en électromagnétisme que dans les cas étudiés *l'indice de réfraction relatif est bien liés aux célérités de la lumière dans les différents milieux par les relations :*

$$n_{\text{plexiglas/air}} = 1,5 = \frac{c_{\text{air}}}{c_{\text{plexiglas}}}$$

$$n_{\text{air/plexiglas}} = 0,667 = \frac{c_{\text{plexiglas}}}{c_{\text{air}}}$$

c étant la *célérité de la lumière dans ce milieu*.

Cette relation est vérifiée en général. On définit l'*indice de réfraction absolu* n pour un milieu transparent :

$$n = \frac{c_{\text{vide}}}{c}$$

2.6 Indice de réfraction absolu d'un milieu

La *durée τ du trajet* de la lumière d'un point A à un point B dépend de la *vitesse $v(M)$ de la propagation de la lumière* en chaque point M du trajet ; si on note $c = 299\,792\,458$ m/s (célérité de la lumière) la vitesse de la lumière dans le vide, on choisira de noter :

$$v(M) = \frac{c}{n(M)}$$

en définissant l'*indice optique ou indice de réfraction absolu $n(M)$* du milieu matériel traversé.

Cet indice optique est *en général supérieur à 1* (ce qui indique $v < c$) mais ce n'est pas une obligation, la vitesse de propagation (ou vitesse de phase) v n'étant pas toujours inférieure à c (ce n'est pas une vitesse matérielle). Dans le cas de certains milieux matériels transparents (les plasmas dans le domaine des ondes radio) on peut avoir $n < 1$.

Notons aussi que *l'indice optique d'un milieu matériel dépend de la fréquence f* ou ce qui revient au même de la longueur d'onde dans le vide ; la dépendance d'un indice avec la longueur d'onde constitue le *phénomène de dispersion*, présent dans tous les milieux matériels sauf le vide.

L'*indice optique* d'un milieu déterminé pour une certaine radiation monochromatique caractérise la *vitesse de propagation* de cette radiation dans ce milieu, v étant la vitesse de propagation de la radiation considérée dans le milieu étudié.

Il vaut par définition :

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

2.7 Indice de réfraction relatif de deux milieux

On définit aussi l'*indice optique relatif du milieu A par rapport au milieu B* comme le rapport des vitesses v_A / v_B , v_A et v_B étant les vitesses de la même radiation simple dans les milieux A et B, soit :

$$n_{A/B} = \frac{v_A}{v_B}$$

Par exemple, l'eau a un indice de 4/3 par rapport à l'air puisque :

$$4/3 = \frac{300000}{225000}$$

On montre aisément à l'aide des formules précédentes que :

$$n_{A/B} = \frac{n_B}{n_A}$$

Indices de réfraction de différents milieux

Milieu	Indice	Vitesse de la lumière
Le vide	1.0000	299 792 km/s
L'air (son indice peut varier selon la température et la pression de l'air)	1.0008	299 552 km/s
L'eau	1.3300	225 407 km/s
Les verres organiques	1.500 à 1.740	de 199 861 à 172 294 km/s
Les verres minéraux	1.525 à 1.900	de 196 584 à 158 452 km/s
Le diamant	2.460	121 868 km/s

Indice de réfraction absolu

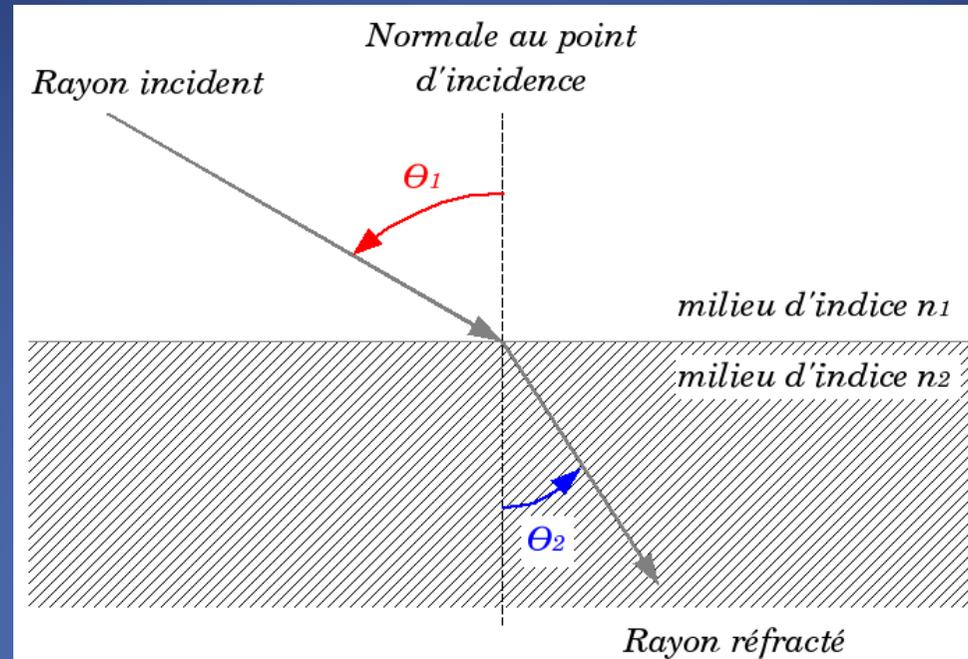
vide	1,0000
air (0°C, 101kPa)	1,0003
eau	1,33
alcool éthylique	1,36
quartz	1,46
glycérine	1,47
lucite et plexiglas	1,51
verre crown	1,52
chlorure de sodium	1,53
verre (cristal)	1,54
rubis	1,54
Verre flint	1,65
zircon	1,92
diamant	2,42

Milieu	Indice	Milieu	Indice
Vide	exactement 1	Chlorure de sodium (sel)	1,54
Air (CNTP)	1,00029	Glace	1,31
Eau (20°)	1,333	Alcool	1,36
Quartz	1,4584	Benzène	1,501
Verre	1,52	Polystyrène	1,59
Diamant	2,417	Phosphure de Gallium	3,5

2.8 Exercices (indice de réfraction)

1. La vitesse de la lumière dans un plastique est de $2,0 \times 10^8$ m/s. Quel est l'indice de réfraction de ce plastique ? (*Rép.* 1,5)
2. Calculez la vitesse de la lumière dans l'eau sachant que l'indice de réfraction de l'eau vaut $4/3$ (*Rép.* 225 000 km/s)

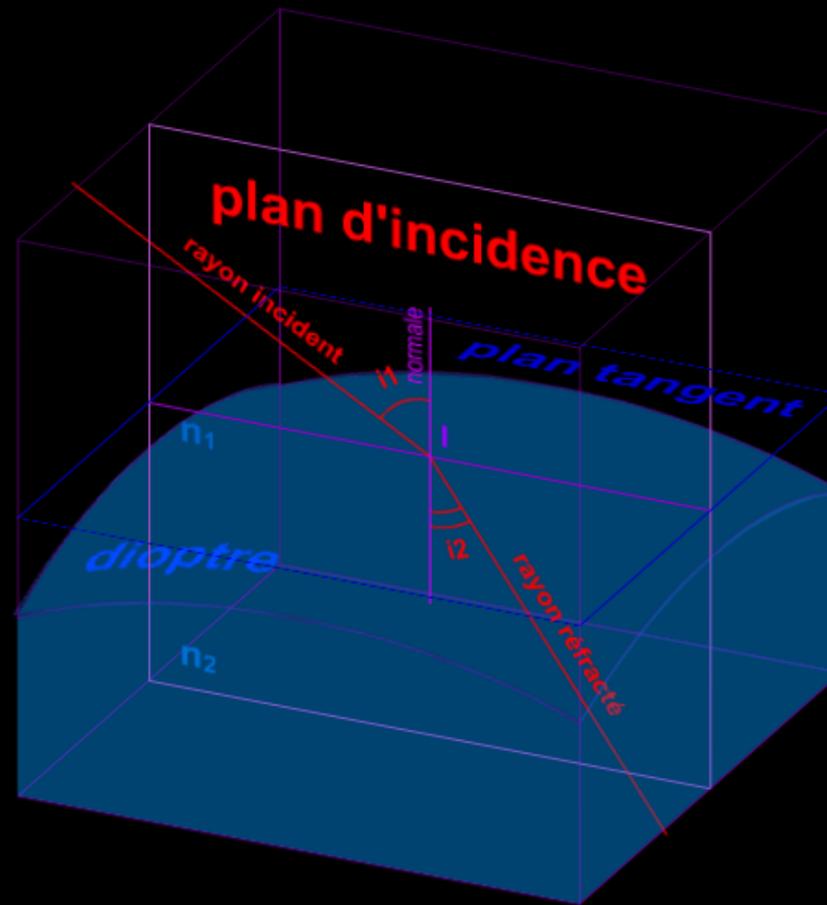
2.9 Lois de la réfraction



- ✓ le rayon incident, la normale au point d'incidence et le rayon réfracté sont coplanaires ;
- ✓ l'angle de réfraction et l'angle d'incidence vérifient la loi de Snell-Descartes :

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

- ✓ Si l'on inverse le sens de parcours de la lumière, la direction des rayons reste inchangée (*principe de retour inverse de la lumière*).



plein écran

$i_1 = 60^\circ$

$i_2 = 35.3^\circ$

$n_1 = 1.00$

$n_2 = 1.50$

vue de face

[Fichier en local](#)

http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve_tulloue/optiqueGeo/dioptres/Descartes.php

<http://www.wontu.fr>

LES LOIS DE SNELL - DESCARTES

Les notations : *rayons incident, réfléchi et transmis*

Première loi : *le plan des trois rayons*

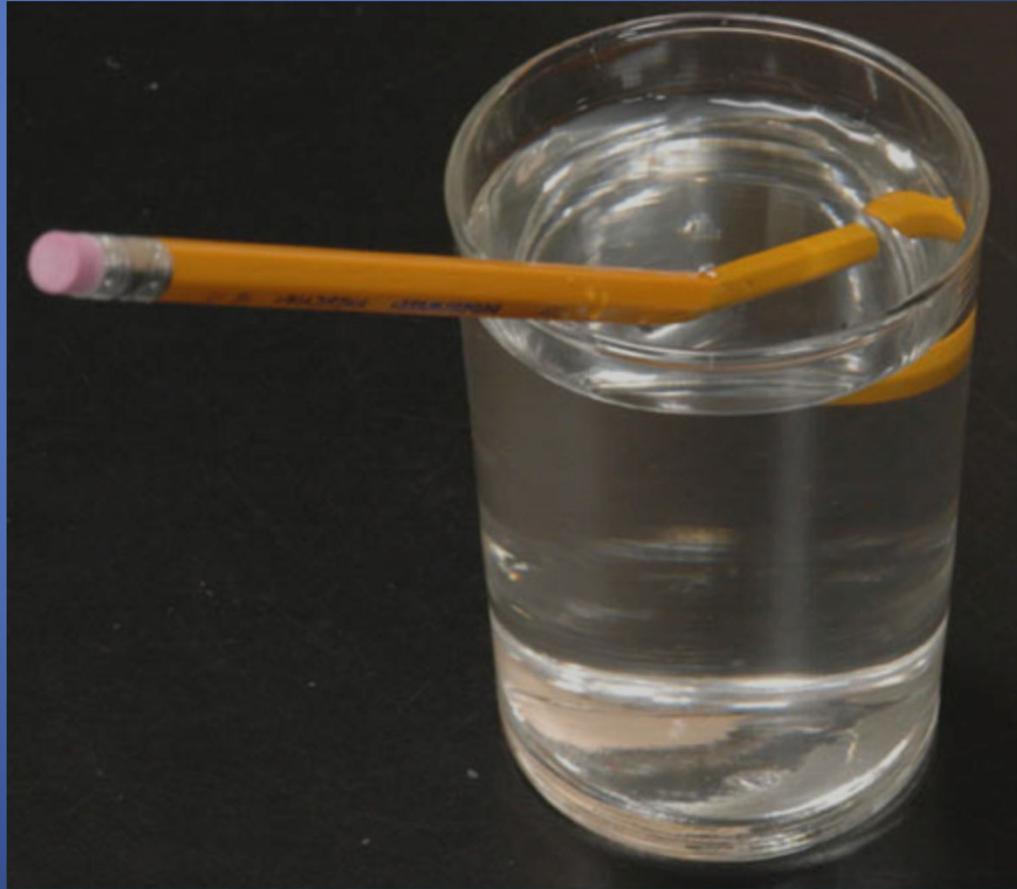
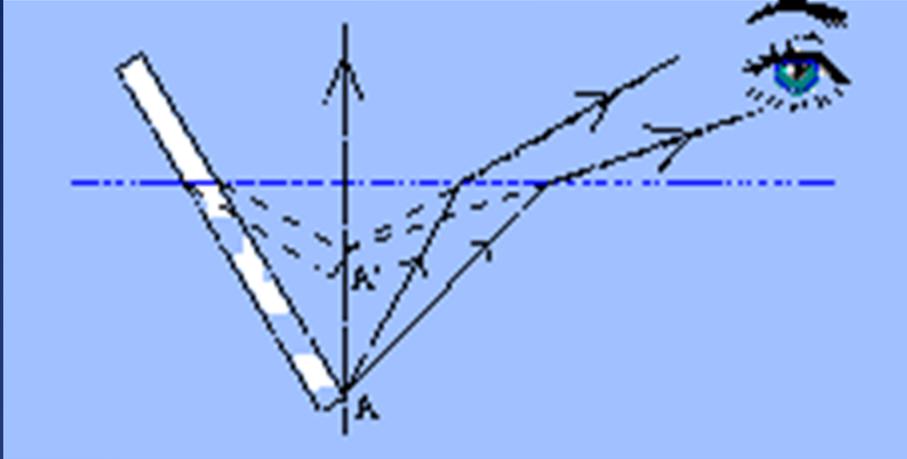
Deuxième loi : *lien entre l'incidence et la réflexion*

Troisième loi : *lien entre l'incidence et la transmission*

[Fichier en local](#)

<http://www.wontu.fr/animation-snell-descartes.htm>

[Lien vers un autre applet en local](#)

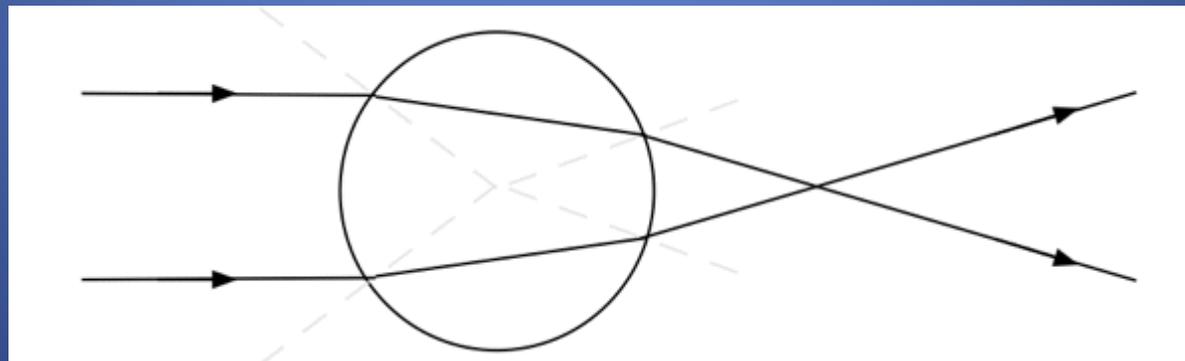




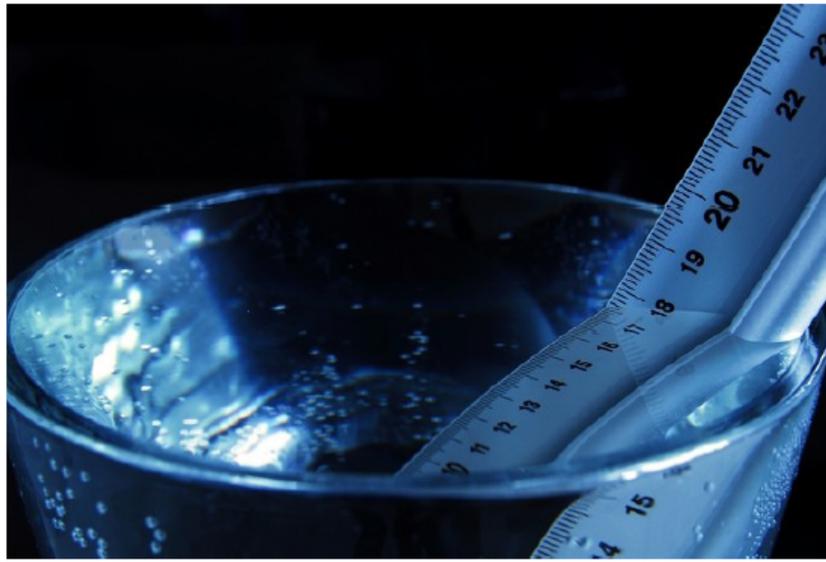
The optics of a water glass. Photograph: Mike Gal



The optics of a wine glass. Photograph: Mike Gal



*La réfraction par une lentille cylindrique peut produire
une inversion gauche/droite*

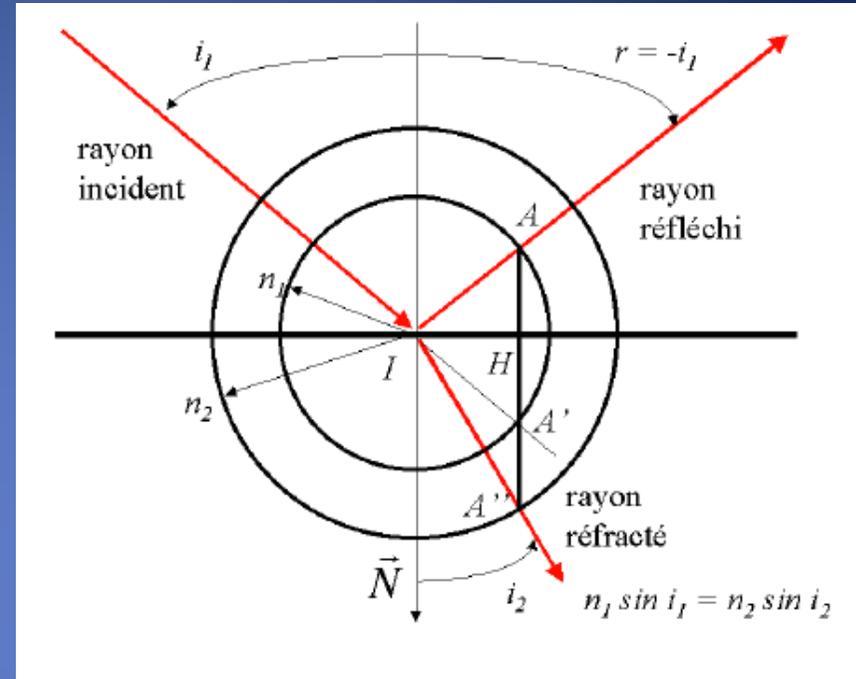


*Deux exemples sur les effets de la réfraction
lors du passage de la lumière entre l'eau
et l'air. Dans le deuxième exemple, les verres
d'eau se comportent comme des lentilles*



Construction de Descartes des rayons réfléchis et réfractés

1. Tracer le rayon incident, notons I le point d'incidence ;
2. Tracer le cercle C_1 , de centre I et de rayon n_1 (unité de distance arbitraire) ;
3. Tracer le cercle C_2 , de centre I et de rayon n_2 ;
4. Prolonger dans le milieu émergent le rayon incident qui coupe le cercle C_1 au point A' ;
5. Tracer la droite parallèle à la normale au dioptre en I passant par A' ; cette droite coupe le cercle C_2 dans le milieu émergent au point A'' , le dioptre au point H et le cercle C_1 dans le milieu incident au point A ;
6. Tracer la **droite** (IA) dans le milieu incident : c'est le **rayon réfléchi**.
7. Tracer la **droite** (IA'') dans le milieu émergent : c'est le **rayon réfracté**.



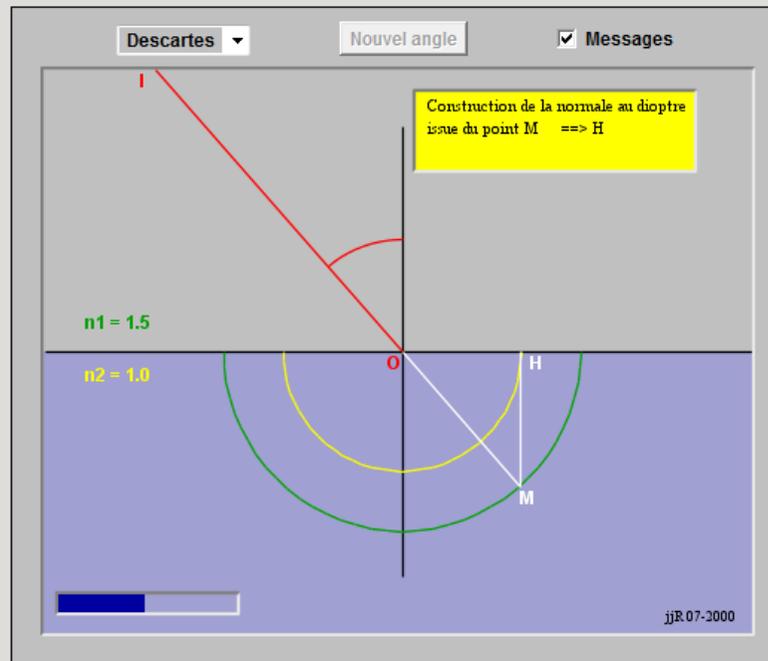
Par construction, on vérifie que :

$$IA = IA' = n_1$$

$$IA'' = n_2$$

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

Constructions d'Huygens et Descartes



Vérifiez que cette construction est équivalente à la relation : $n_1 \cdot \sin(i_1) = n_2 \cdot \sin(i_2)$.

Dans le cas $n_1 > n_2$, la construction n'est possible que si le point T est situé à l'extérieur de la sphère de rayon n_2 . Cette condition définit l'angle "limite". Sinon, il y a réflexion totale sur le dioptre.

Construction de Descartes :

On utilise la surface des indices. C'est la surface engendrée par un rayon vecteur dont la longueur est celle de l'indice dans la direction étudiée. Dans un milieu isotrope, la surface des indices est une sphère de rayon égal à l'indice du milieu.

Du point d'incidence choisi comme centre, on trace les sphères de rayons n_1 et n_2 . M est l'intersection du rayon incident avec la sphère de rayon n_1 . De M on abaisse la perpendiculaire sur le dioptre. Cette droite MT traverse (sauf cas de réflexion totale) la sphère de rayon n_2 en N qui définit la direction du rayon émergent ON.

Cette construction simple permet de traduire géométriquement la loi de Descartes. Il est plus difficile que pour la construction d'Huygens de lui donner un sens physique.

Construction d'Huygens :

Pour cette construction, on utilise la surface d'onde. C'est le lieu des points atteints par la lumière issue d'une source ponctuelle au bout du temps unité. Dans un milieu isotrope, la surface d'onde est une sphère dont le rayon est l'inverse de l'indice du milieu. Le plan d'onde, dans une direction donnée, est tangent à la surface d'onde et dans un milieu isotrope, les rayons lumineux sont normaux aux plans d'onde.

Pour construire le rayon réfracté lors de la traversée d'un dioptre, on considère une source secondaire d'Huygens, située sur le dioptre au point d'incidence.

De ce point, on trace la surface d'onde dans les deux milieux.

A partir du rayon incident, on déduit la position du plan d'onde incident MT et donc du plan d'onde émergent NT (Ils sont émis au même instant).

Enfin, on peut tracer le rayon émergent ON (normal au plan d'onde émergent).

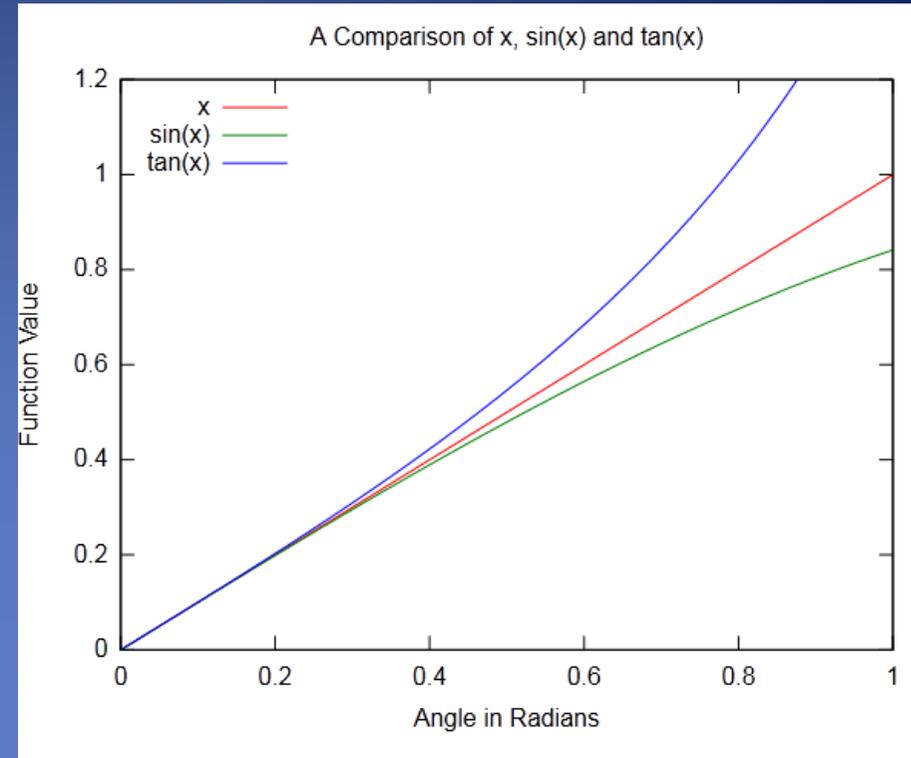
<http://ressources.univ-lemans.fr/AccesLibre/UM/Pedago/physique/02/optigeo/huyghens.html>

<E:\Dropbox\Simulations le Mans\simule\optigeo\huyghens.html>

Remarque : loi de Kepler de la réfraction

Pour des petits angles d'incidence, on peut réaliser l'approximation suivante :

$$\sin i_1 \approx i_1$$



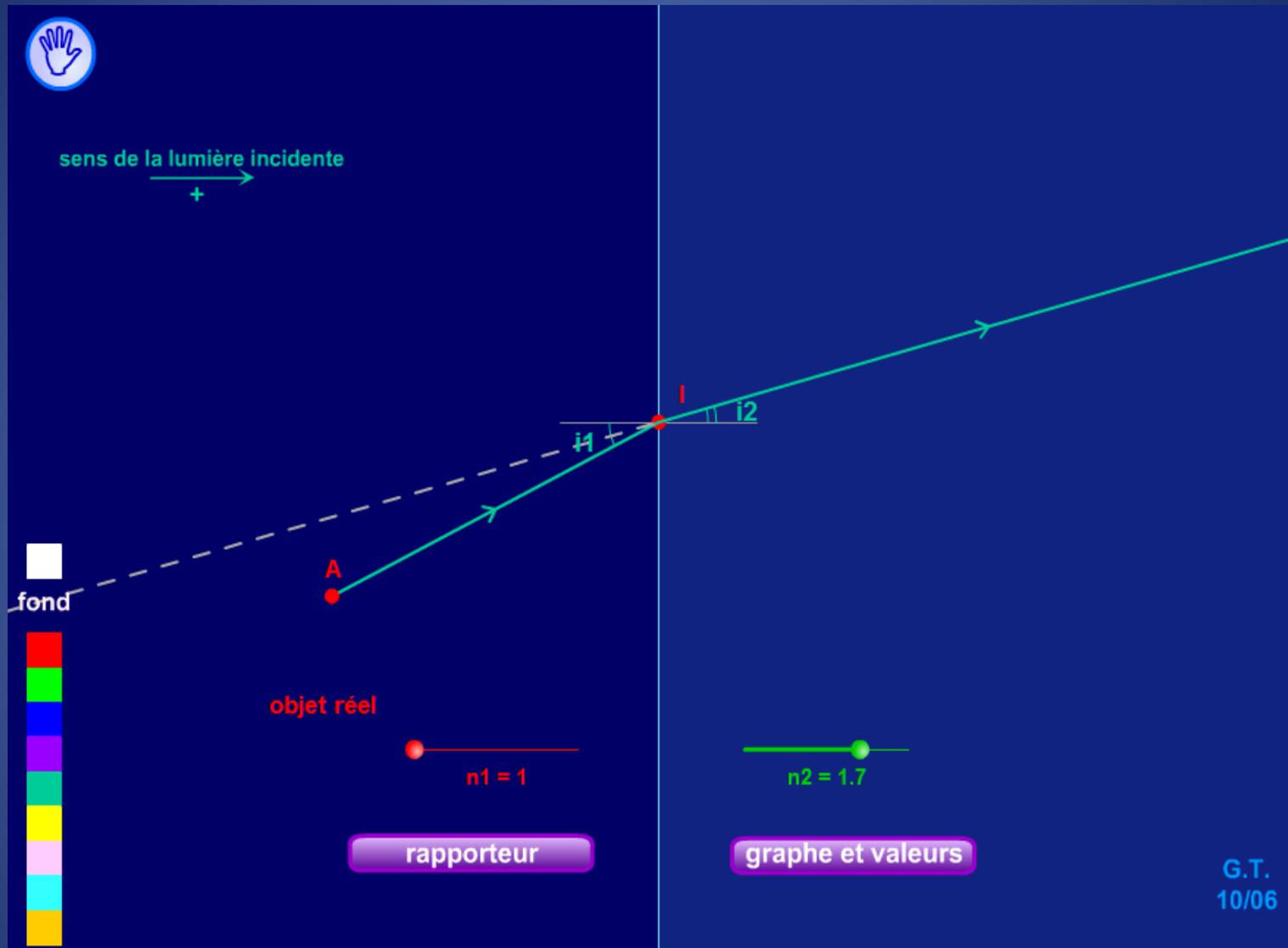
Et donc on obtient la relation :

qui constitue la *loi de Kepler de la réfraction*.

Attention, dans cette relation, les angles sont exprimés en radians !

$$n_1 \cdot i_1 = n_2 \cdot i_2$$

Dioptre plan : étude de la réfraction

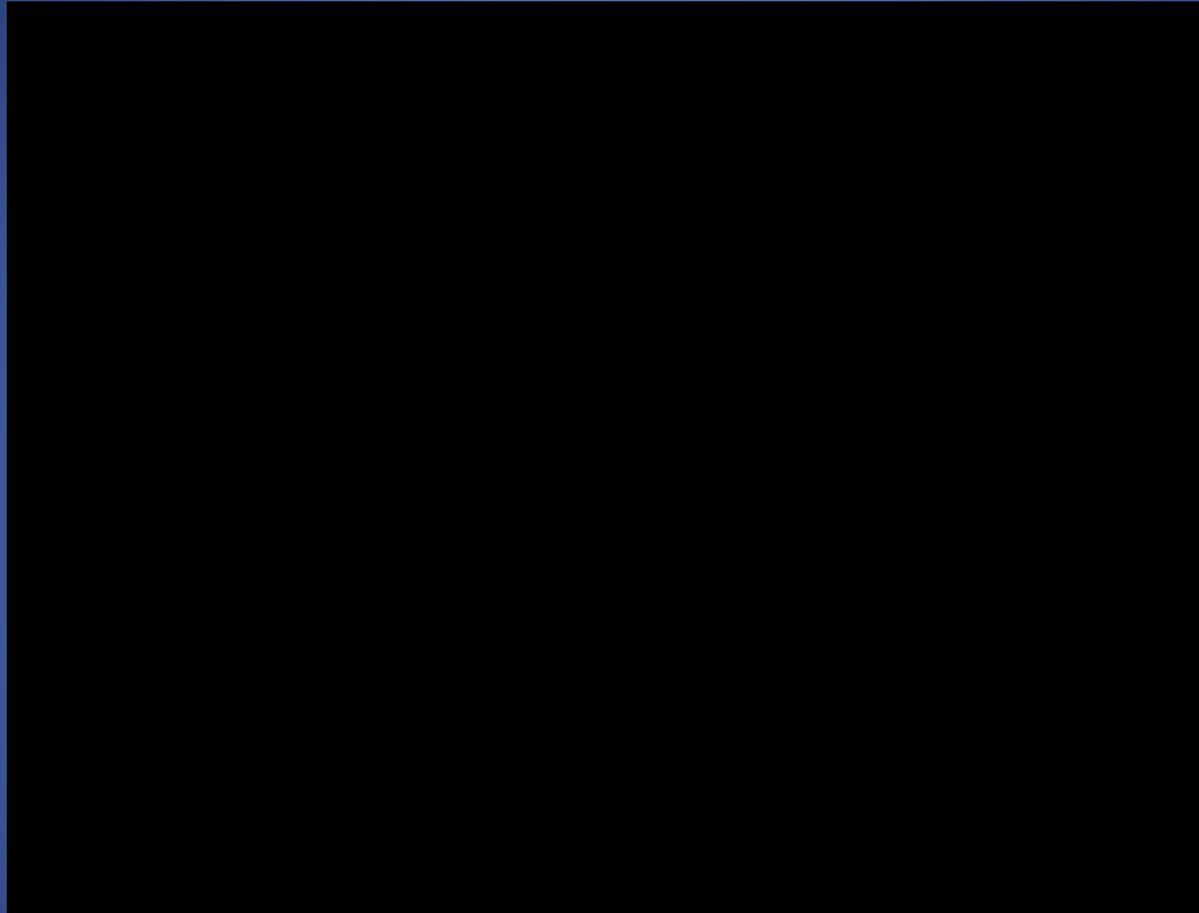


[Fichier en local](#)

http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve_tulloue/optiqueGeo/dioptres/dioptre_plan.php

Dioptre plan : étude de la réfraction

<http://www.youtube.com/watch?NR=1&v=8VZHym6HqVU>



Réfraction dans le verre

http://uel.unisciel.fr/physique/optigeo/optigeo_ch02/co/observer_ch02_1.html

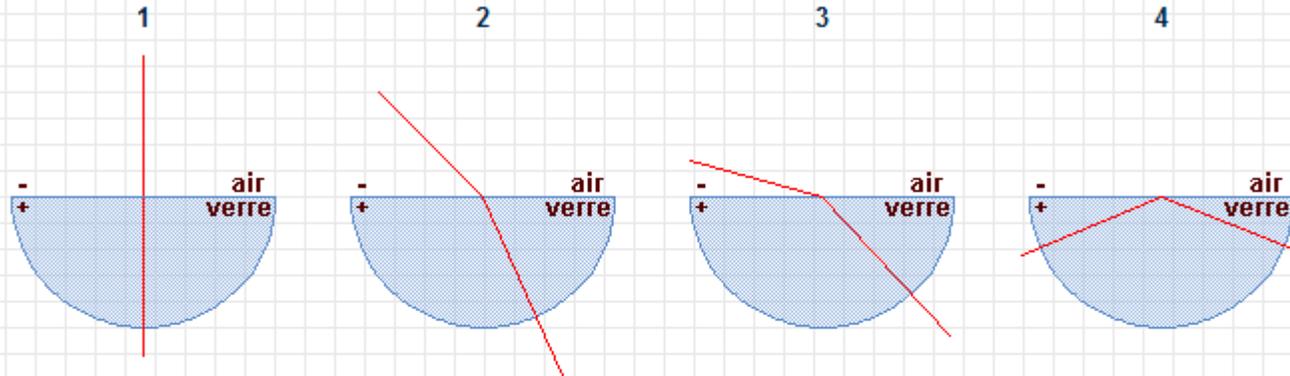
Réfraction dans l'eau

http://uel.unisciel.fr/physique/optigeo/optigeo_ch02/co/observer_ch02_2.html



Observations qualitatives

Dirigeons un fin faisceau lumineux **de l'air dans le verre** et **du verre dans l'air**; le faisceau lumineux venant du bas et dirigé vers le centre du demi-cylindre n'est pas dévié car il est normal à la surface du verre, il figure donc la lumière passant du verre dans l'air.



Un **rayon normal** au dioptré **n'est pas dévié**.

Un **rayon oblique** au dioptré et venant de l'air se réfracte en **se rapprochant** de la normale au point d'incidence.

Un **rayon oblique** au dioptré et venant du verre se réfracte en **s'écartant** de la normale au point d'incidence.

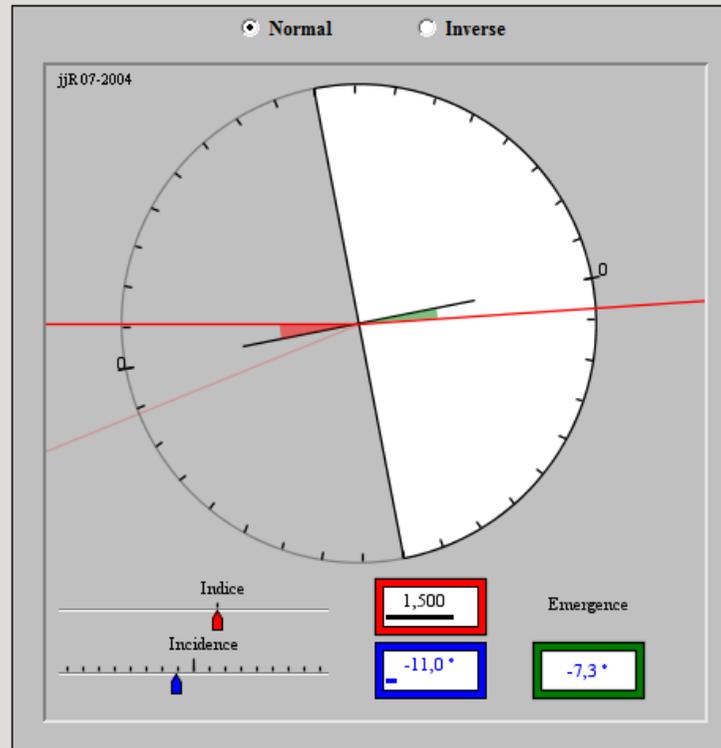
Plus l'amplitude de l'**angle d'incidence** augmente, plus l'amplitude de l'**angle de réfraction** augmente.

Le **retour inverse de la lumière**: la lumière conserve les mêmes directions qu'elle passe de l'air dans le verre ou du verre dans l'air.

Lorsque la lumière passe du verre dans l'air, elle ne se réfracte plus vers l'air si l'amplitude de l'angle d'incidence est supérieure à une certaine valeur limite: elle **se réfléchit totalement** dans le verre.

Dioptré plan, lentille hémicylindrique

Dioptré plan, lentille hémicylindrique



Un dioptré est la surface de séparation entre deux milieux d'indices différents n_1 et n_2 . Quand un rayon lumineux arrive sur un dioptré une partie t de la lumière est transmise et la quantité $r = 1 - t$ est réfléchie. Les [formules de Fresnel](#) (dédites des équations de Maxwell) permettent le calcul des coefficients de réflexion r et de transmission t .

Le rayon incident et la normale au dioptré issue du point d'incidence définissent le plan d'incidence.

On constate que (lois de Snell-Descartes) :

* Les rayons réfléchis et réfractés sont contenus dans le plan d'incidence.

* L'angle d'émergence du rayon réfléchi est l'opposé de l'angle i d'incidence et l'angle r d'émergence du rayon réfracté est tel que :

$$n_1 \cdot \sin(i) = n_2 \cdot \sin(r) \quad (1)$$

Quand on passe d'un milieu d'indice n_1 à un milieu d'indice n_2 inférieur, on peut (conformément à la relation (1)) observer le phénomène de réflexion totale : si l'angle d'incidence dépasse la valeur limite, il n'y a plus de rayon réfracté.

Lentille hémicylindrique.

Cette lentille (d'indice n) associée à un laser est très pratique pour la mise en évidence du phénomène.

Montage normal : On envoie un rayon (contenu dans un plan normal à l'axe du cylindre) sur la face plane et au centre du demi-cercle. Une partie de la lumière est réfractée selon la loi $n \cdot \sin(i) = n_2 \cdot \sin(r)$. Le rayon réfracté étant issu du centre de la lentille arrive donc avec une incidence nulle sur le dioptré de sortie et n'est pas dévié. L'alidade associée à la lentille permet la mesure des angles et la vérification des lois de la réfraction.

Montage inverse : Dans ce cas, le rayon incident traverse le demi-cylindre avant d'atteindre le centre du demi-cercle. Il n'y a pas de réfraction sur le dioptré d'entrée (incidence nulle) et sur le dioptré de sortie, on a $n \cdot \sin(i) = \sin(r)$. Dans ce cas, il est possible d'observer le phénomène de réflexion totale.

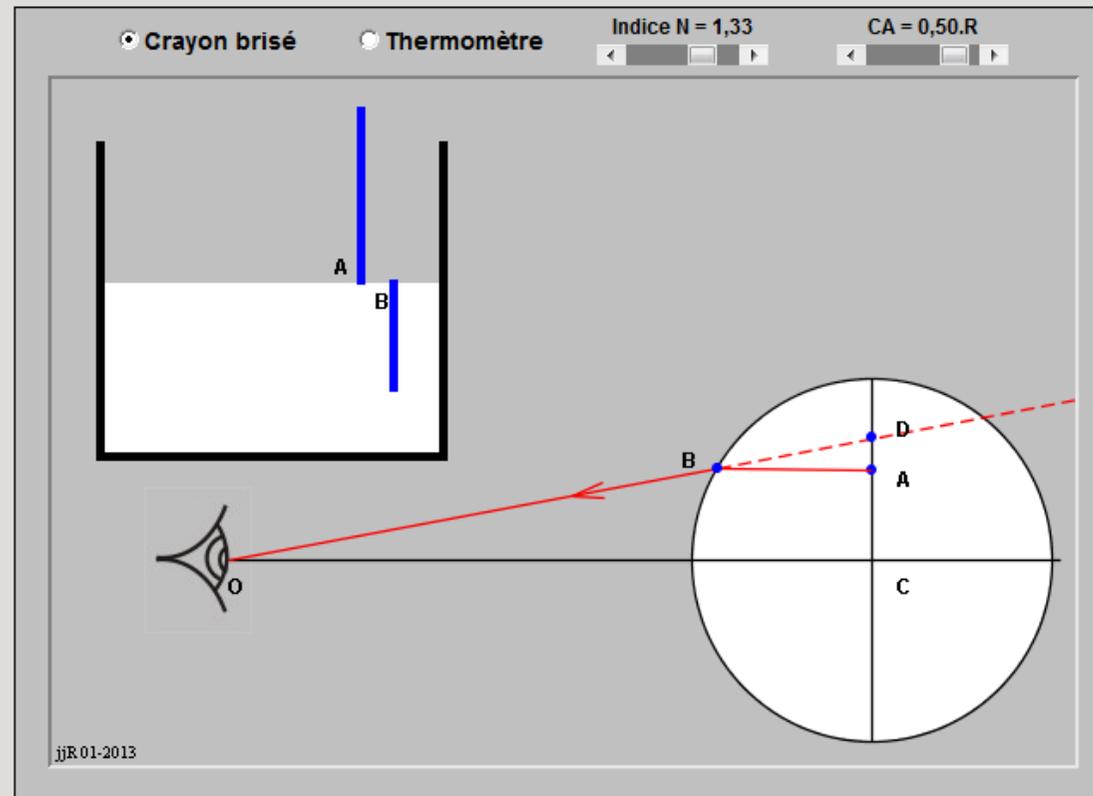
Illustrations du phénomène de réfraction

*Deux illustrations
de la réfraction
de la lumière*



<http://www.youtube.com/watch?v=Fme-MGB1yWY>

Deux illusions liées à la réfraction



Crayon brisé

Dans un récipient cylindrique transparent à demi rempli d'eau, on place verticalement un crayon à demi immergé. On déplace le crayon le long du diamètre normal à la ligne de visée de l'observateur. A cause de la réfraction par le dioptre cylindrique, la partie immergée du crayon située à la verticale de A semble située à la verticale de D.

Pour déterminer la position du point D, il faut déterminer le rayon issu de A qui passe par le point O (œil de l'observateur).

Exercice :

On nomme α l'angle COB, β l'angle OCB, γ l'angle entre BA et la droite horizontale passant par B, $k = CA / R$, $D = OC$.

Montrer que le point B est tel que $\tan(\gamma) = (\sin(\beta) - k) / \cos(\beta)$. (a)

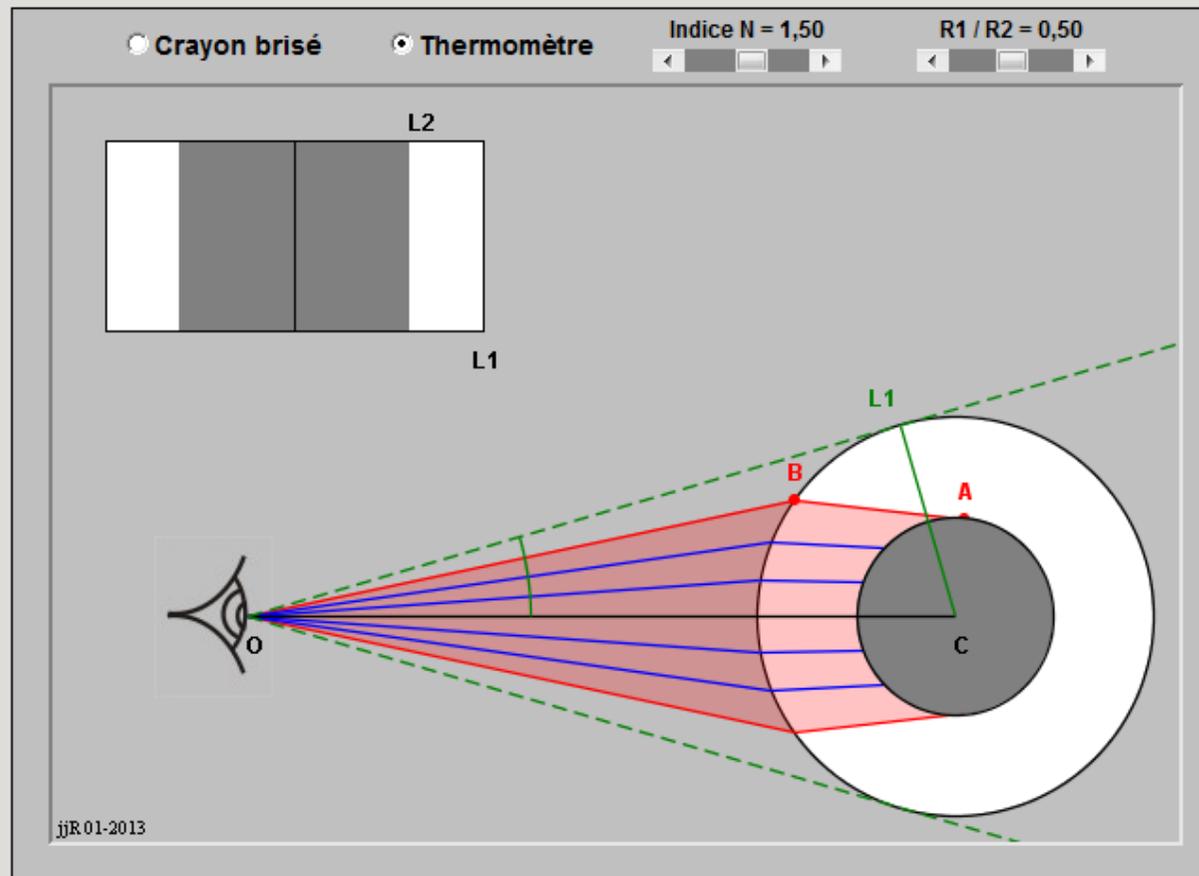
La valeur de l'angle γ est fonction de R, D, k, N, α et β .

L'équation (a) ne peut être résolue que numériquement par une méthode de zéro.

<http://ressources.univ-lemans.fr/AccesLibre/UM/Pedago/physique/02/optigeo/refracpara.html>

<E:\Dropbox\Simulations le Mans\simule\optigeo\refracpara.html>

Deux illusions liées à la réfraction



Tube de thermomètre

On examine un tube cylindrique en verre de rayon extérieur $R1$ et de rayon intérieur $R2$ rempli par un liquide opaque.

L'œil de l'observateur est placé en O .

On pose α_M la valeur de l'angle entre OC et la tangente $OL1$ à $R1$.

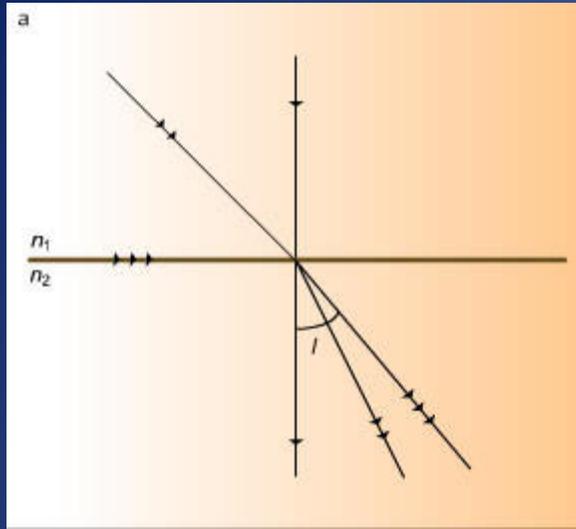
La largeur apparente du tube extérieur est donc pour l'opérateur $L1 = 2R1 \cdot \cos(\alpha_M)$.

Pour déterminer la largeur apparente du tube intérieur, il faut chercher la valeur de l'angle α (COB) qui donne après réfraction en B un émergent qui est tangent au cercle de rayon $R2$.

Le rayon réfracté en B coupe le cercle de rayon $R2$ en 0, 1 ou 2 points. Le rayon tangent correspond à la racine double de l'équation du second degré obtenue en cherchant l'intersection du rayon BA avec le cercle de rayon $R2$. Il correspond à la valeur nulle du discriminant Δ de cette équation.

Δ est une fonction de α , N , $R1$, $R2$, $D = OC$. La recherche de son zéro ne peut être résolue que numériquement.

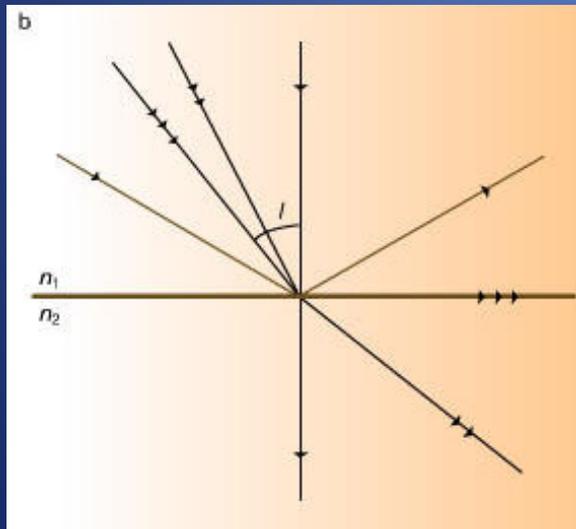
2.10 Réfraction et phénomène de réflexion totale



On dit qu'un milieu est *plus réfringent* qu'un autre si son *indice de réfraction est plus élevé*.

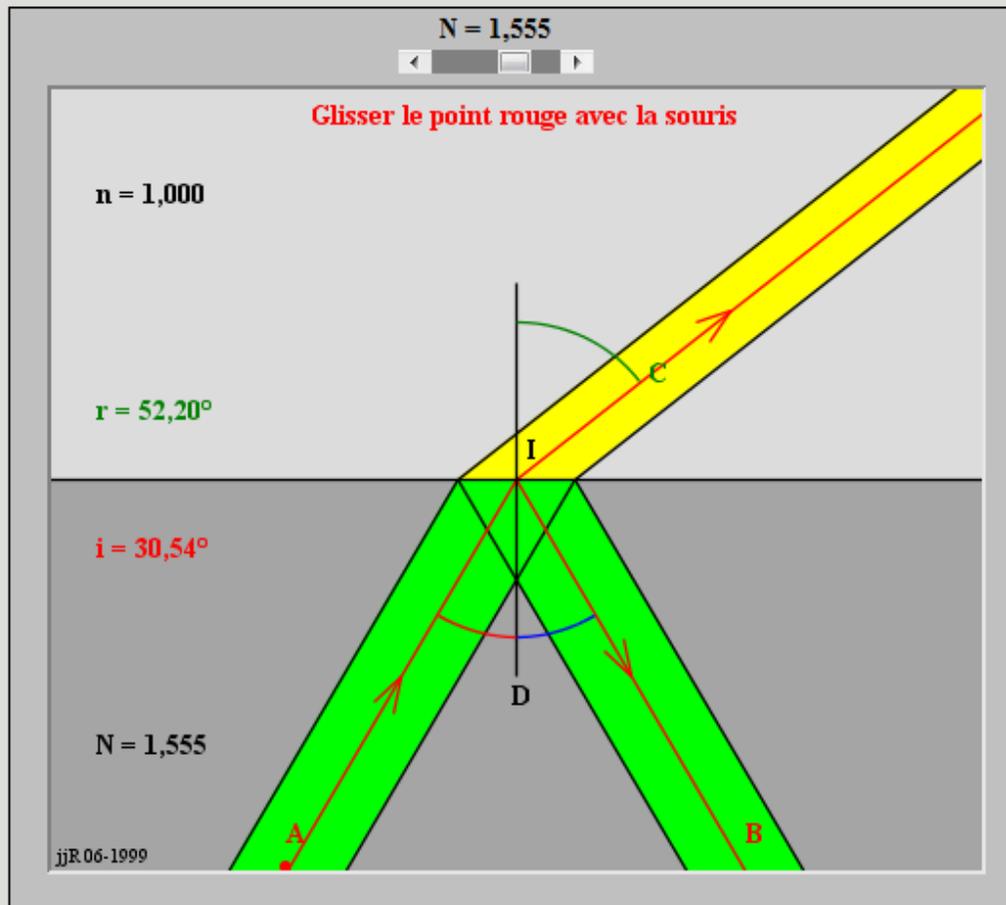
Lorsque la *lumière va d'un milieu moins réfringent à un milieu plus réfringent* ($n_2 > n_1$), l'angle de réfraction est plus petit que l'angle d'incidence, et le rayon réfracté *se rapproche de la normale*.

Plus l'indice de réfraction n_2 est grand, plus le rayon réfracté s'approche de la normale.



Lorsque la *lumière va d'un milieu plus réfringent à un milieu moins réfringent*, c'est-à-dire lorsque l'indice de réfraction n_2 est plus petit que n_1 (par exemple : passage du verre à l'air), l'angle de réfraction est plus grand que l'angle d'incidence et le rayon réfracté *s'éloigne de la normale*.

Dioptré plan



Un dioptré est la surface de séparation entre deux milieux d'indices différents n et N .

Quand un rayon lumineux arrive sur un dioptré une partie t de la lumière est transmise et la quantité $r = 1 - t$ est réfléchié. Les Formules de Fresnel (dédites des équations de Maxwell) permettent le calcul des coefficients de réflexion r et de transmission t .

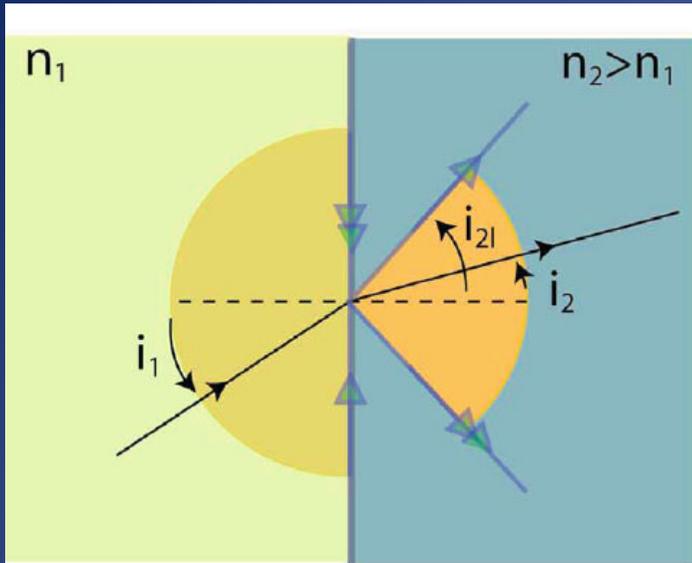
Conformément aux lois de Descartes, les rayons réfléchiés et réfractés sont dans le plan d'incidence, l'angle d'émergence du rayon réfléchi est l'opposé de l'angle i d'incidence et l'angle r d'émergence du rayon réfracté est tel que :

$$N \cdot \sin(i) = n \cdot \sin(r) \quad (1)$$

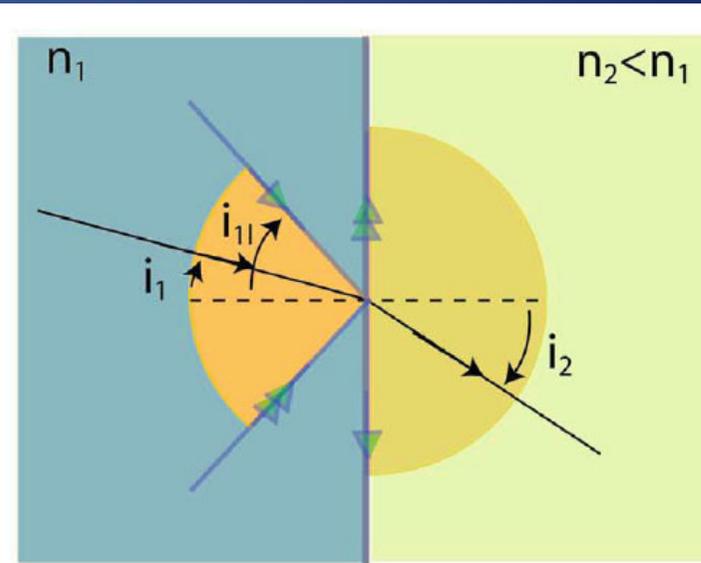
Quand on passe d'un milieu d'indice N à un milieu d'indice n inférieur, on peut (conformément à la relation (1)) observer le phénomène de **réflexion totale**.

Si l'angle d'incidence dépasse la valeur limite $i_L = \text{Arcsin}(n/N)$, il n'y a plus de rayon réfracté.

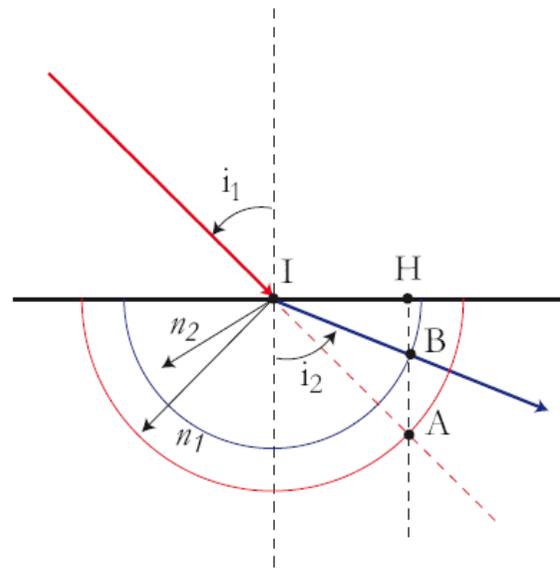
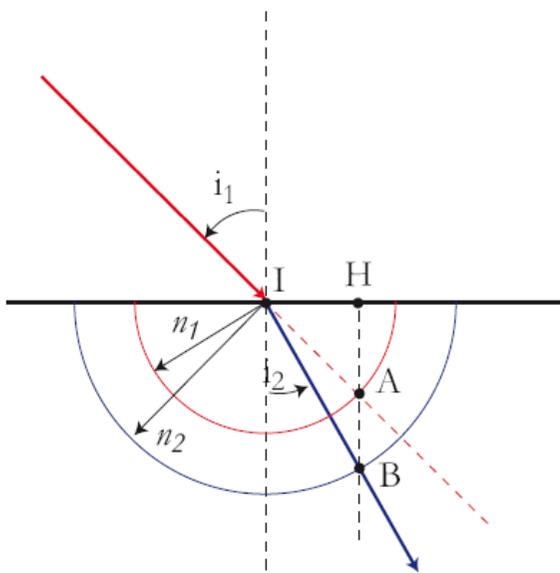
Si on éclaire un dioptré plan avec un faisceau de lumière parallèle tous les rayons du faisceau frappent le dioptré avec la même incidence : les rayons des faisceaux réfléchiés et réfractés restent parallèles.



Passage d'un milieu moins réfringent vers un milieu plus réfringent



Passage d'un milieu plus réfringent vers un milieu moins réfringent



Constructions de Descartes du rayon réfracté dans le cas du passage d'un milieu moins réfringent à un milieu plus réfringent ou inversement.



Il existe donc une *incidence limite*, dite « *angle critique* » au delà de laquelle il n'y a *plus de rayon réfracté* : on parle de *réflexion totale*.

En appliquant la loi de Snell-Descartes avec $r_{\max} = 90^\circ$, on trouve pour l'angle critique la valeur de :

$$i_{\max} = \arcsin \frac{n_2}{n_1}$$

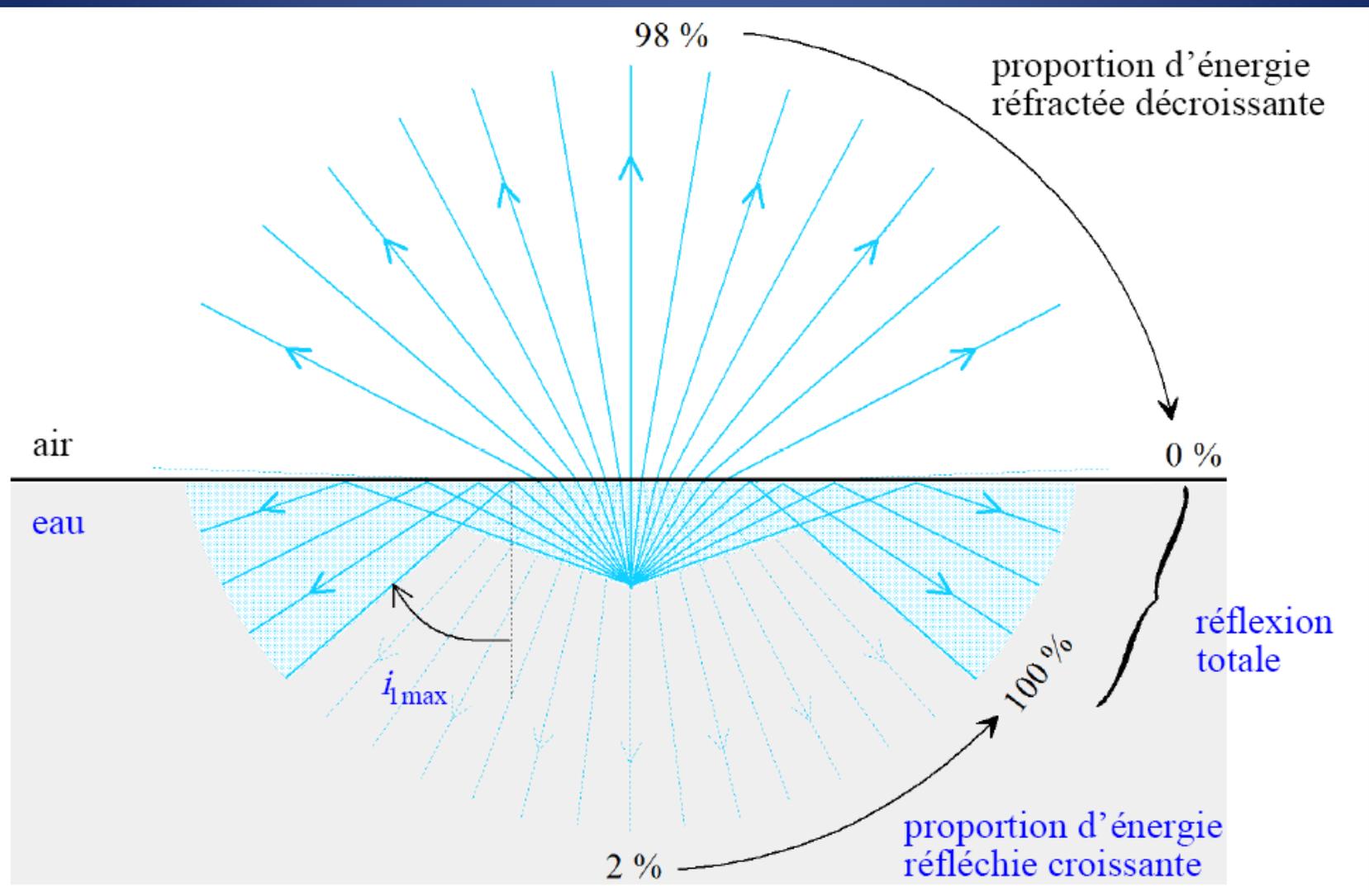
http://uel.unisciel.fr/physique/optigeo/optigeo_ch02/co/apprendre_ch02_04.html

n_1
 n_2

$n_2 \cdot \sin i = n_1 \cdot \sin r$
si $r = 90^\circ$ $i = \lambda$
donc $n_2 \cdot \sin \lambda = n_1$
soit $\sin \lambda = \frac{n_1}{n_2}$

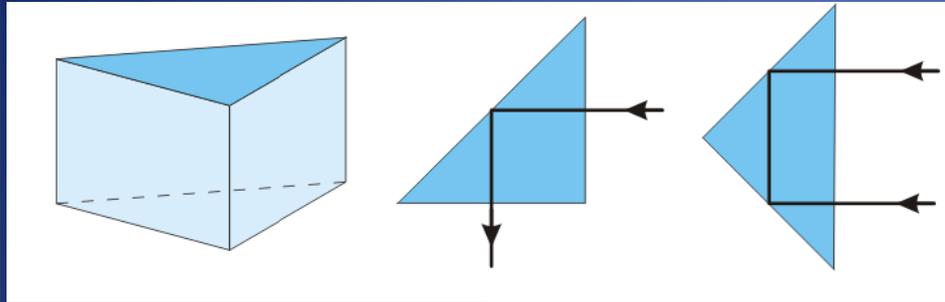
L'angle d'incidence i est de 53.3° .

Suite



Cette propriété est mise à profit dans certains systèmes réflecteurs comme

✓ le *prisme à réflexion totale* (prisme rectangle à trois côtés qui peut dévier un rayon de 90° ou de 180°).



http://uel.unisciel.fr/physique/optigeo/optigeo_ch02/co/simuler_ch02_07.html

http://uel.unisciel.fr/physique/optigeo/optigeo_ch05/co/observer_ch05_07.html

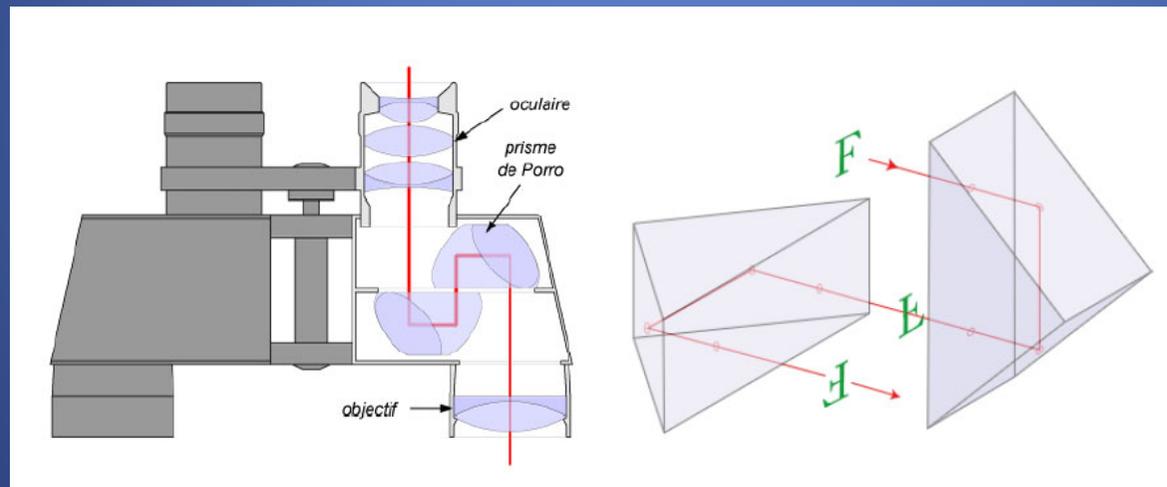
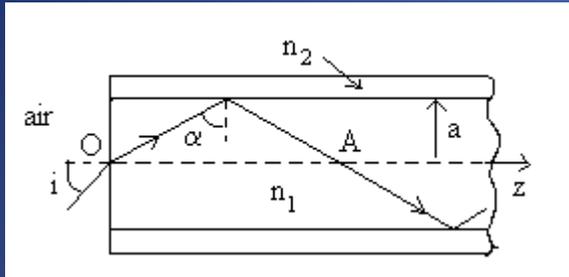


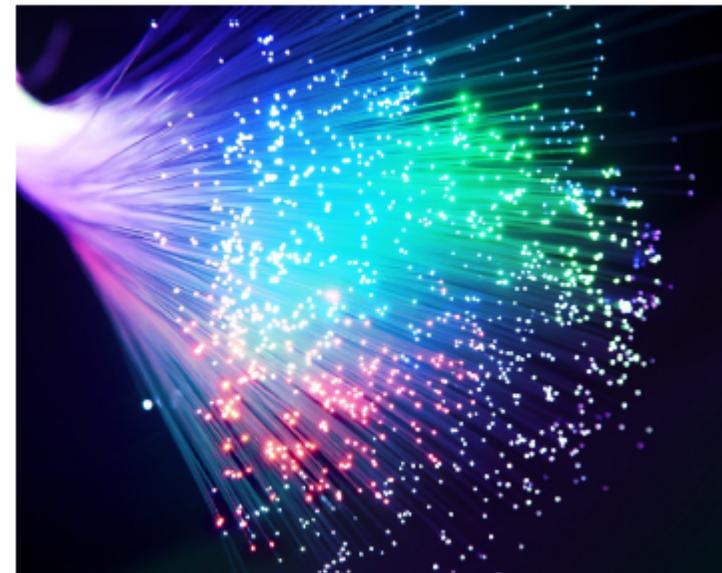
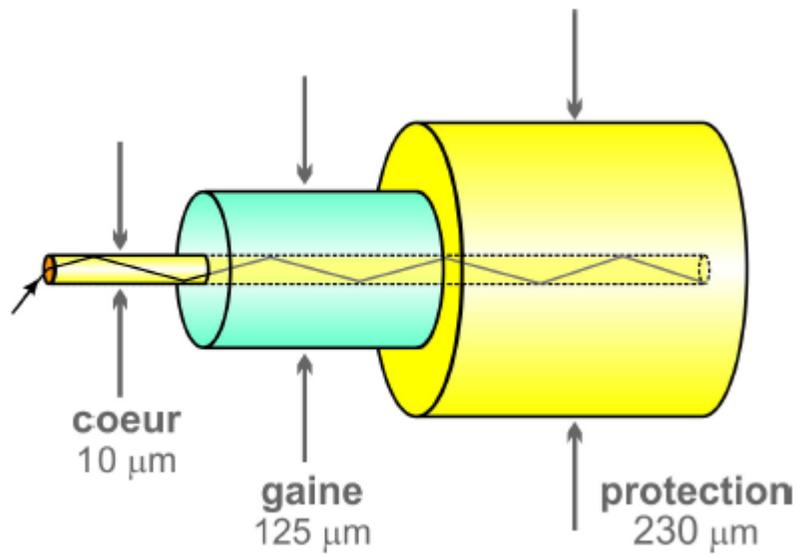
Schéma des jumelles . Pour permettre l'observation d'images terrestres redressées (droites), un système de prismes est interposé dans le chemin lumineux. Ces prismes sont appelés prismes de Porro. Ils permettent le redressement de l'image indispensable dans les jumelles et permettent également de diminuer la longueur des appareils. À part du système à prismes de Porro existe aussi le système à prismes en toit.

✓ les *fibres optiques*.



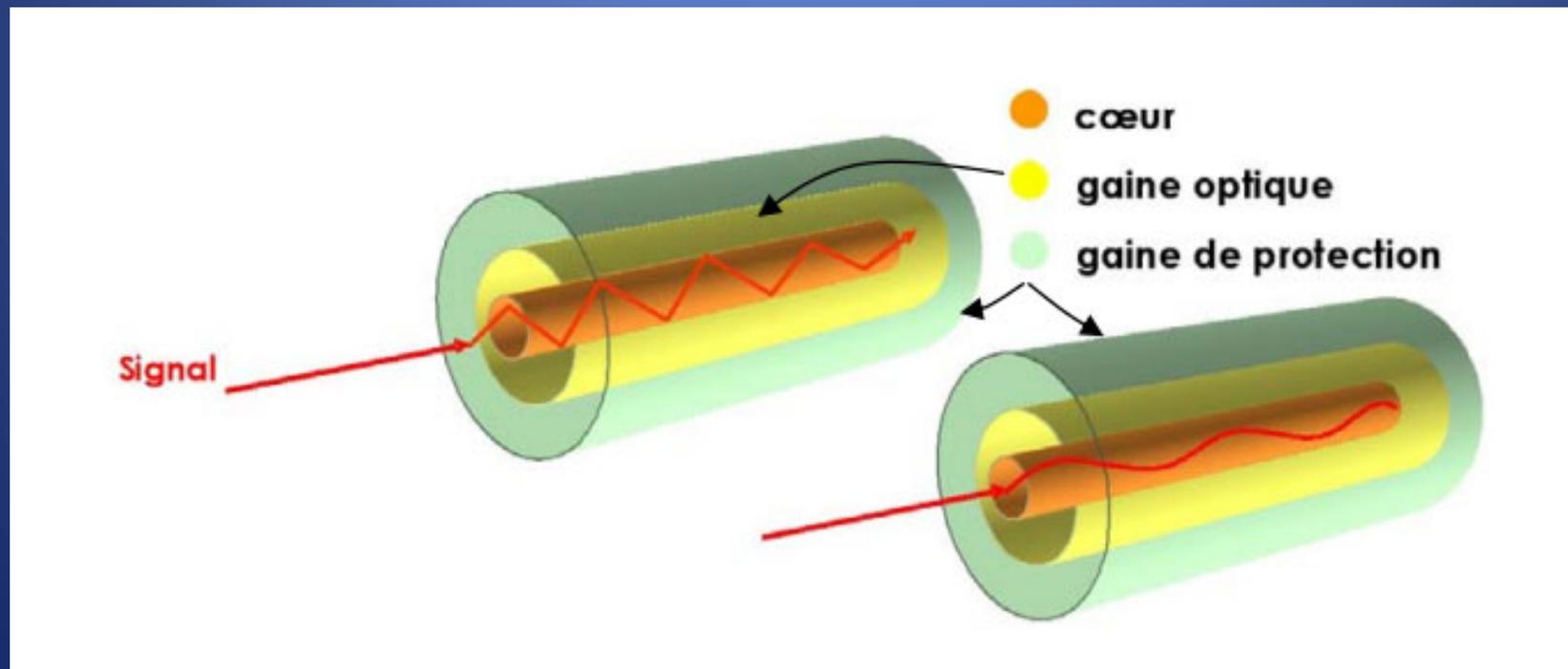
http://uel.unisciel.fr/physique/optigeo/optigeo_ch02/co/observer_ch02_3.html

http://uel.unisciel.fr/physique/optigeo/optigeo_ch02/co/simuler_ch02_06.html



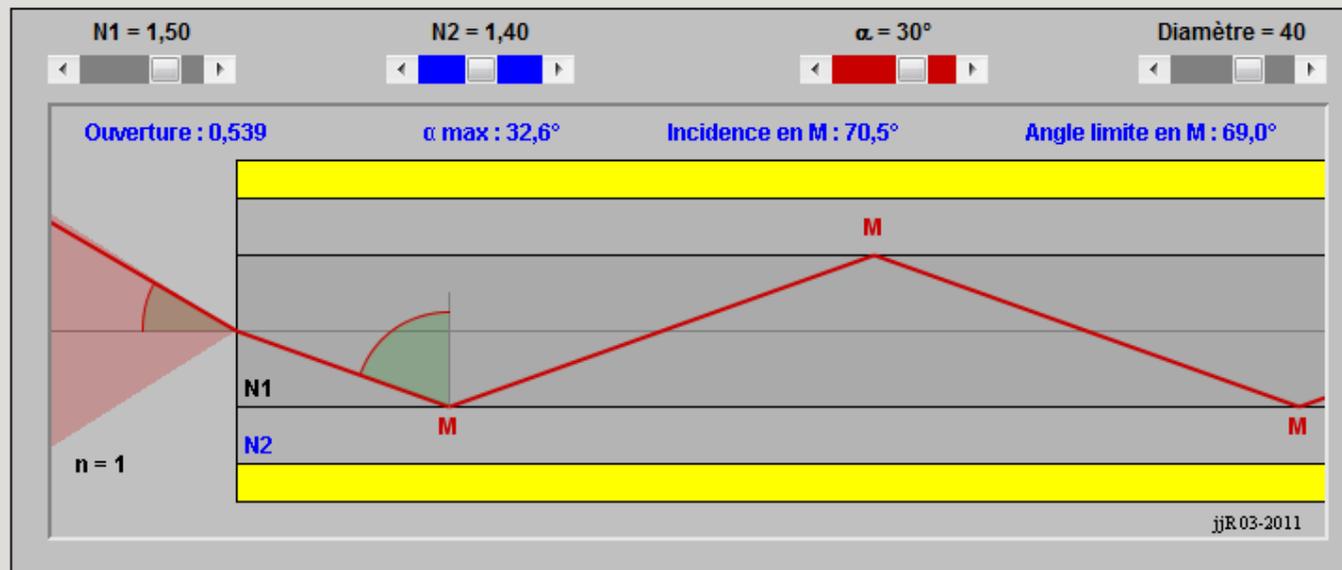
En pratique divers profils d'indice sont utilisés selon le type d'application. Le plus employé est le *profil à saut d'indice*, dans lequel la fibre est constituée de deux zones concentriques homogènes avec un saut brutal d'indice à l'interface, la zone centrale est le *cœur* et la couche périphérique est appelée *gaine optique*. Le plus souvent une enveloppe protectrice assure une protection à la fois mécanique et surtout optique vis à vis de la lumière extérieure.

Il existe aussi des *fibres à gradient d'indice* : les fibres à gradient d'indice ont été spécialement conçues pour les télécommunications. Leur cœur n'est plus homogène, l'indice de réfraction décroît depuis l'axe jusqu'à l'interface.



A droite : fibre optique à saut d'indice ; à gauche : fibre optique à gradient d'indice

Fibre optique à saut d'indice



Une fibre optique à saut d'indice est constituée d'un cœur cylindrique transparent d'indice constant N_1 entouré par une gaine concentrique d'indice $N_2 < N_1$. Le tout est entouré par une enveloppe de protection mécanique et optique. Pour une fibre industrielle le diamètre du cœur (silice avec $N_1 = 1,456$) vaut $200 \mu\text{m}$ et le diamètre de la gaine (silicone avec $N_2 = 1,410$) vaut $380 \mu\text{m}$. On utilise des sources qui émettent vers $1,5 \mu\text{m}$ domaine pour lequel l'atténuation de la silice est minimale.

Si la lumière passe d'un milieu d'indice N_1 à un milieu d'indice $N_2 < N_1$ il existe un angle limite d'incidence $\beta_{\text{lim}} = \text{Arcsin}(N_2/N_1)$ tel qu'il y a réflexion totale sur l'interface.

Si cette condition est réalisée pour la fibre, la lumière reste confinée dans le cœur et peut parcourir de grandes distances avec une atténuation faible. Pour les fibres actuelles l'atténuation est de l'ordre de $0,2 \text{ dB / km}$.

Cette condition est réalisée si l'incidence α des rayons sur la face d'entrée est inférieure à l'angle $\alpha_{\text{lim}} = \text{Arcsin}[(N_1^2 - N_2^2)^{1/4}]$. En effet sur le dioptre d'entrée, on a $n \cdot \sin(\alpha) = N_1 \cdot \sin(r)$ et l'angle d'incidence sur la gaine est tel que $\sin(\beta) = \cos(r)$.

S'il n'y a pas réflexion totale, une partie importante de la lumière est réfractée et une partie très faible est réfléchi (voir les **formules de Fresnel** pour avoir les proportions) : La lumière injectée s'échappe vers l'enveloppe externe de la fibre.

La quantité $(N_1^2 - N_2^2)^{1/4}$ est appelée "ouverture numérique" et le cône d'angle au sommet α_{lim} le "cône d'acceptance".

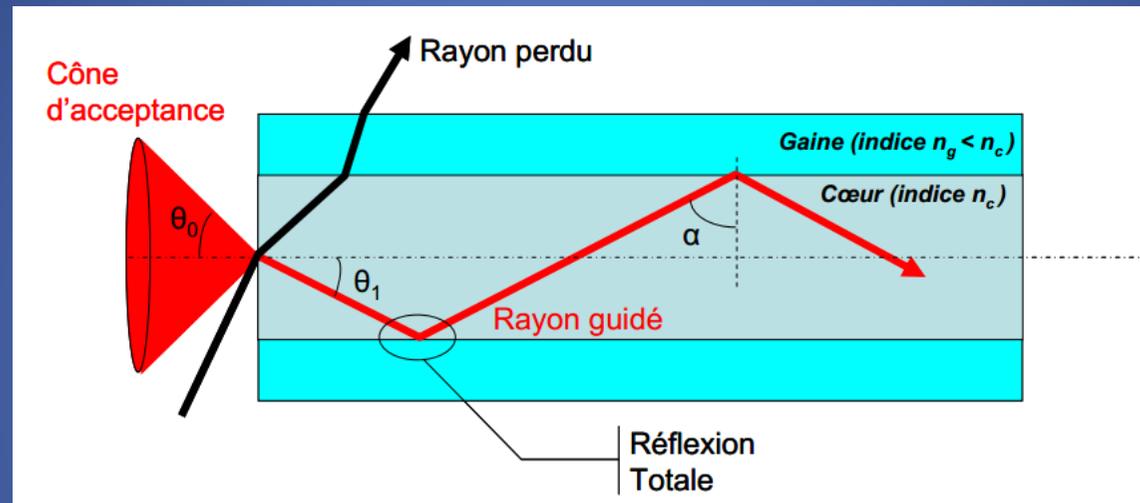
Ce type de fibre présente un inconvénient majeur : le trajet optique dépend de l'angle d'incidence. L'indice du cœur étant constant, la durée du parcours est fonction de l'angle d'incidence ce qui provoque une déformation (étalement) des signaux envoyés dans la fibre. Pour limiter l'influence de ce phénomène, il faut diminuer le diamètre du cœur et utiliser des matériaux d'indice voisins.

Dans une fibre optique la lumière est confinée dans la zone centrale et guidée grâce à la gaine optique. Le plus souvent le cœur et la gaine optique sont en silice ou en verre spécial tandis que la gaine de protection est plus généralement en plastique. Pour obtenir des indices de réfraction différents entre le cœur et la gaine on procédera le plus souvent à un dopage (on injecte des impuretés pour augmenter très légèrement l'indice dans le cœur). La différence d'indice entre le cœur et la gaine, notée Δ , est très faible (autour de 10^{-3}).

La *dimension du cœur* joue un rôle très important : en effet s'il est de *quelque microns* la lumière va s'y propager selon un seul mode, on parle alors de *fibre unimodale* ; si par contre il est de l'ordre de *plusieurs dizaines de microns* on parlera de *fibre multimodale* dans laquelle la propagation de la lumière sera plus complexe avec des phénomènes de dispersion plus importants. C'est pourquoi *la fibre unimodale est préférée en télécommunications* à longue distance.

Pour mettre en équation le processus de guidage on utilisera soit la théorie de la propagation géométrique valable pour des cœurs de grande dimension (vis à vis de la longueur d'onde de la lumière considérée), mais aussi la théorie ondulatoire et les équations de Maxwell plus appropriée pour les faibles diamètres de cœur.

Dans le cadre de ce cours on se limitera à une approche géométrique.



- ✓ pour qu'un rayon soit effectivement guidé dans la fibre il faut que sa direction à l'entrée se situe dans un cône dit d'acceptance. Ce cône contient tous les angles qui vont conduire à un angle α à l'interface cœur/gaine permettant d'avoir une réflexion totale.
- ✓ un rayon guidé va subir cette réflexion totale à chaque fois qu'il va rencontrer l'interface cœur/gaine.
- ✓ un rayon hors du cône d'acceptance sera simplement réfracté à l'entrée dans la fibre puis à l'interface des deux couches, il passera alors dans la gaine et sera perdu.

- ✓ l'angle d'acceptance permet de définir ce qu'on appelle l'ouverture numérique de la fibre, ouverture qui dépend bien évidemment des indices respectifs des deux couches optiques.

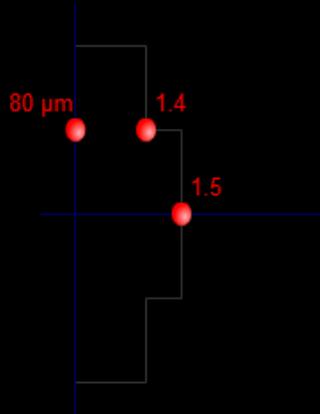
$$O.N. = \sin \theta_0 = \sqrt{n_c^2 - n_g^2} \cong \sqrt{2n_g \Delta n}$$

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.

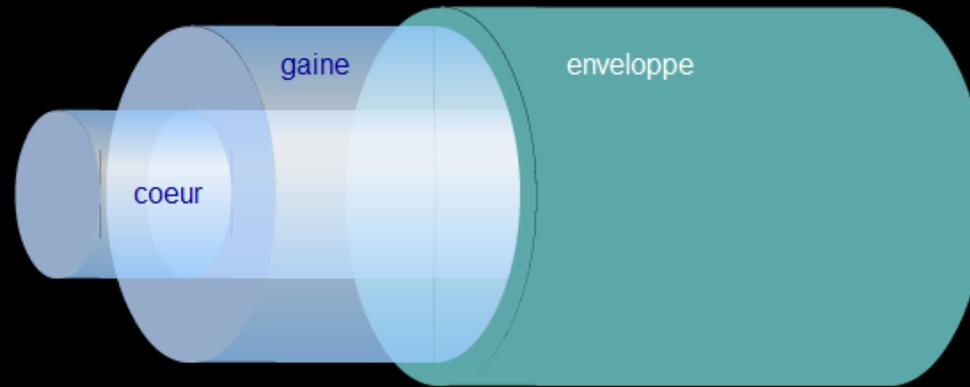


fibres à saut d'indice

G.T.
11/07



ouverture numérique : 0.539
angle d'acceptance : 32.6 °



saut d'indice gradient constant gradient linéaire



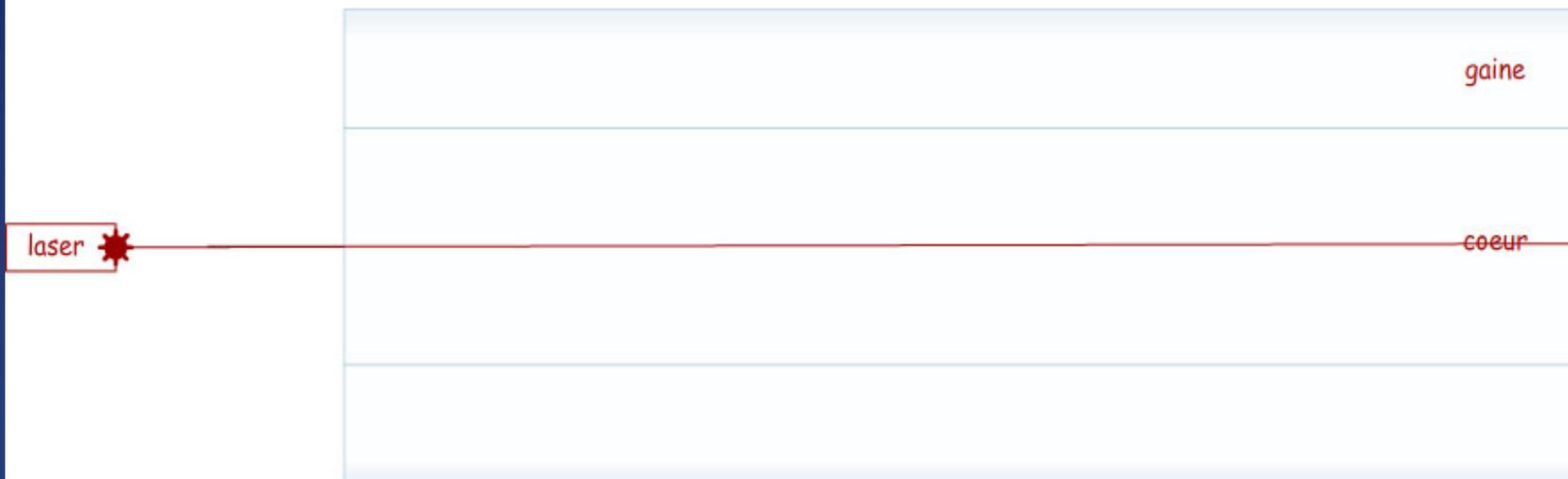
impulsion stop/play effacer

[Fichier en local](#)

http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve_tulloue/optiqueGeo/dioptres/fibre_optique.php



ouverture numérique d'une fibre optique



mesures
des angles

$\alpha : 0.2^\circ$

$\alpha_1 : 0.1^\circ$

$\alpha_2 : 89.9^\circ$

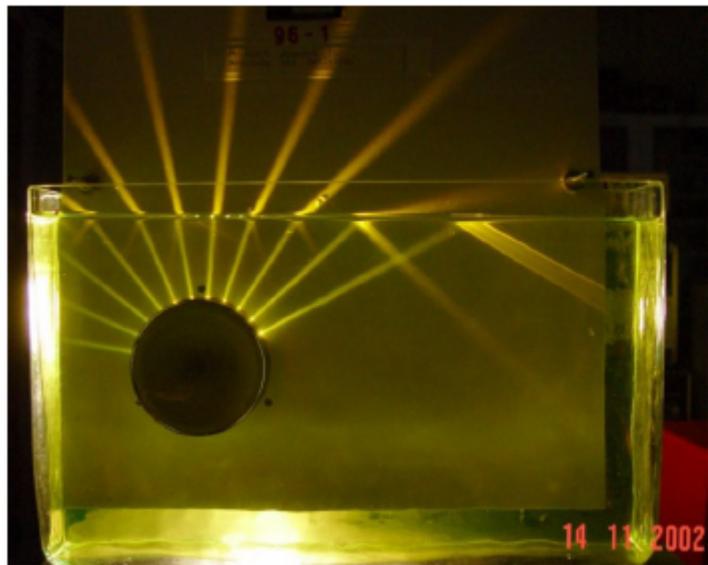
1.5
indice du coeur

1.5
indice de la gaine

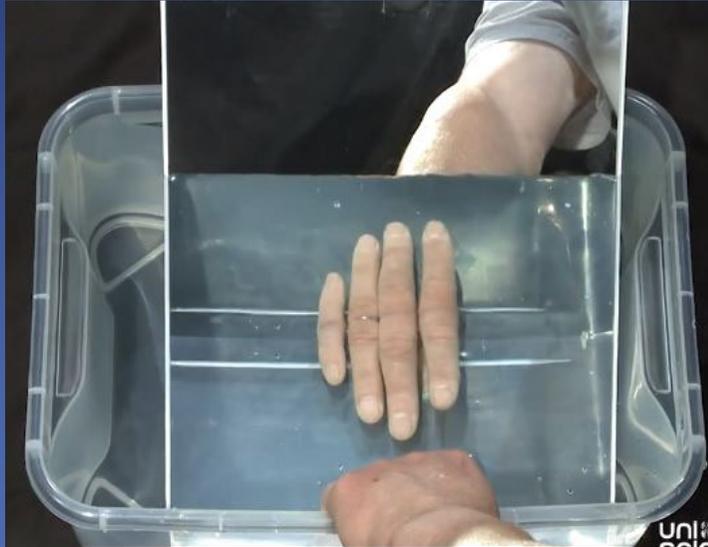
Régler la valeur de l'indice du coeur et de l'indice de la gaine de la fibre optique.

[Fichier en local](#)

http://ww2.ac-poitiers.fr/math_sp/IMG/swf/ouvertureNumerique.swf



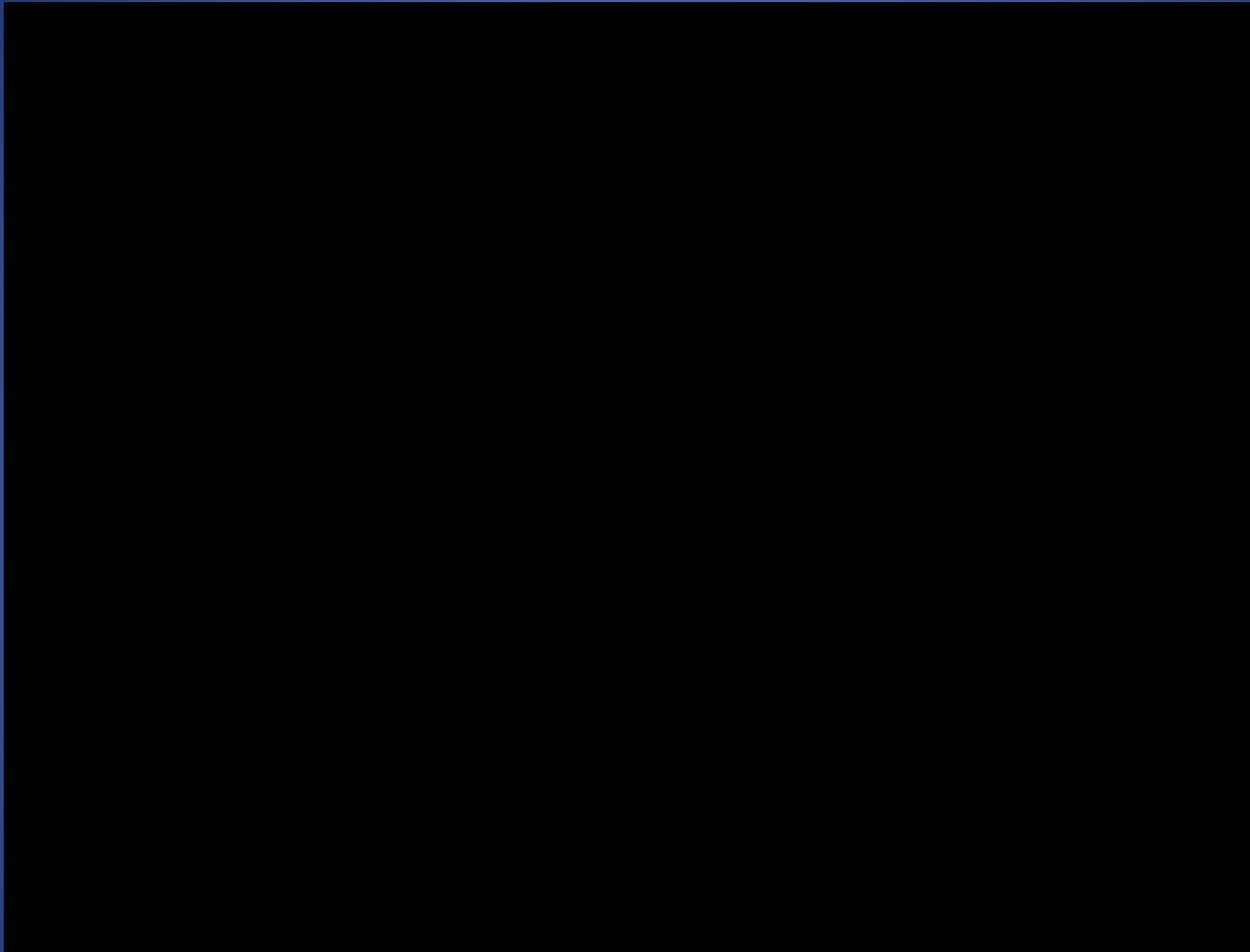
Expérience montrant la réfraction et la réflexion totale. Droite : Banpo-Bridge en Corée du Sud. La lumière peut aussi être guidée (partiellement) à l'intérieur d'un jet d'eau par réflexion totale.



[Fichier en local](#)

<http://phymain.unisciel.fr/les-doigts-doubles/>

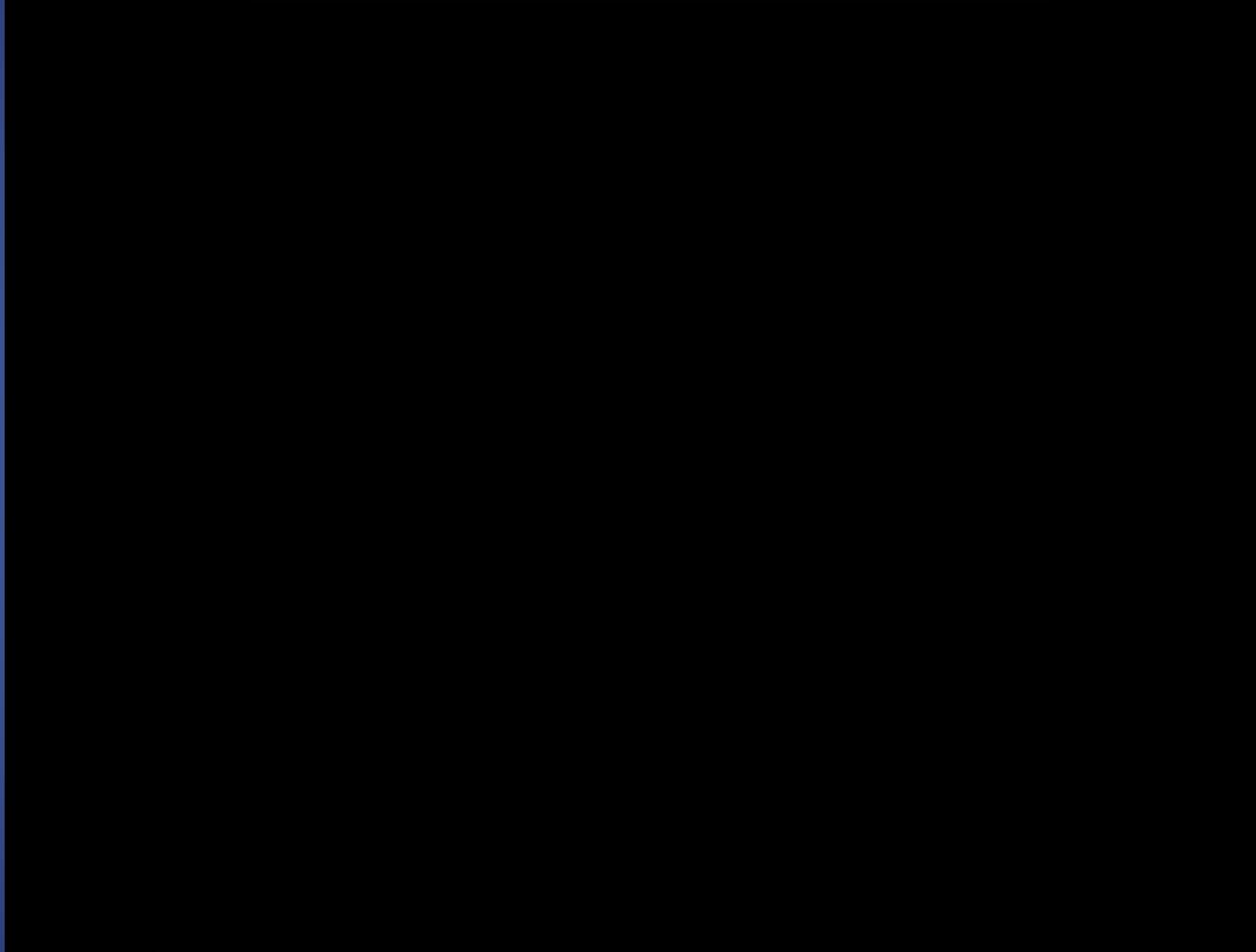
L'eau comme guide d'onde



http://www.youtube.com/watch?NR=1&v=hBQ8fh_Fp04



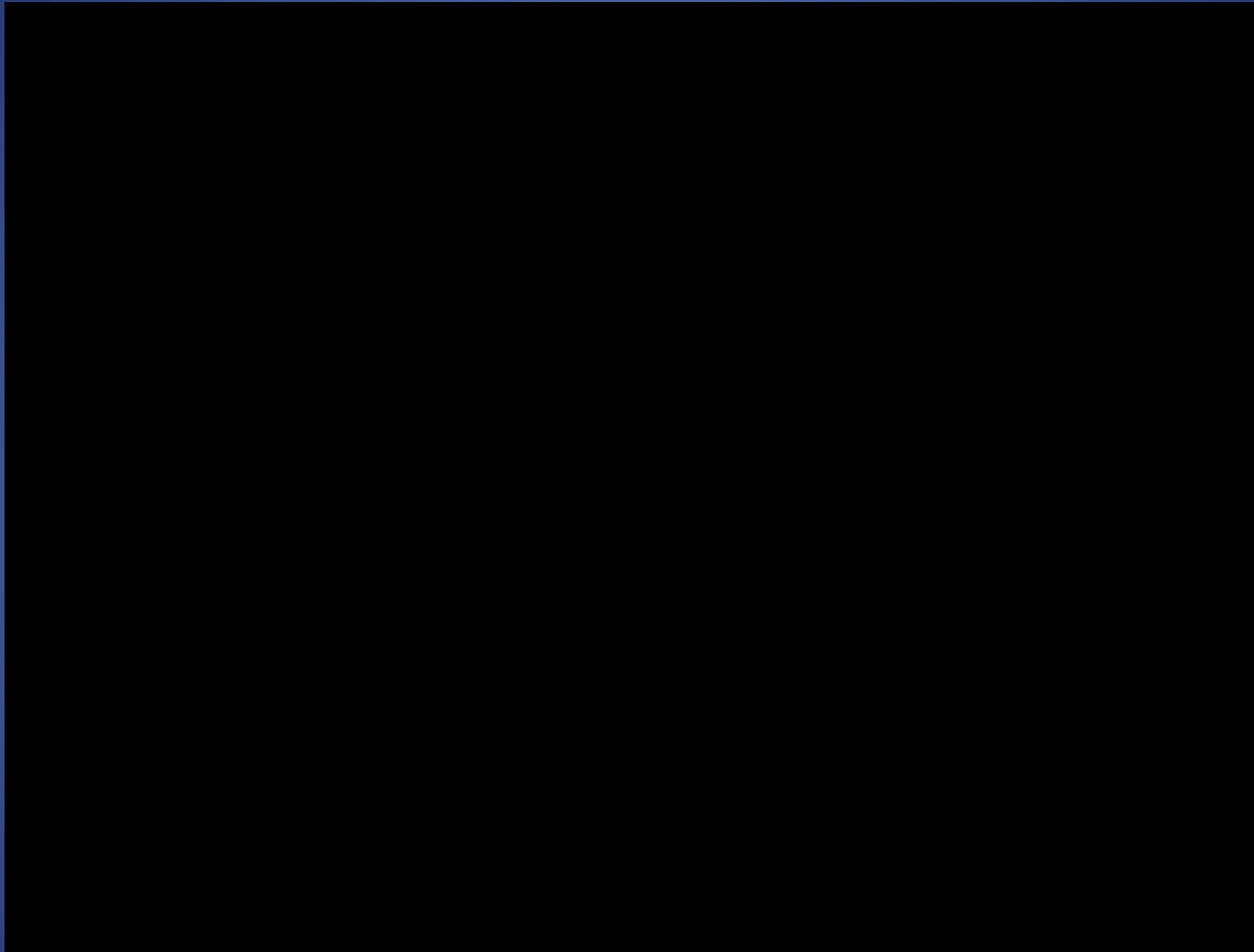
Le plastique comme guide d'onde



http://www.youtube.com/watch?NR=1&v=hBQ8fh_Fp04



Réflexion, réfraction et réflexion interne à l'interface eau-air



<http://www.youtube.com/watch?v=2kBOqfS0nmE>

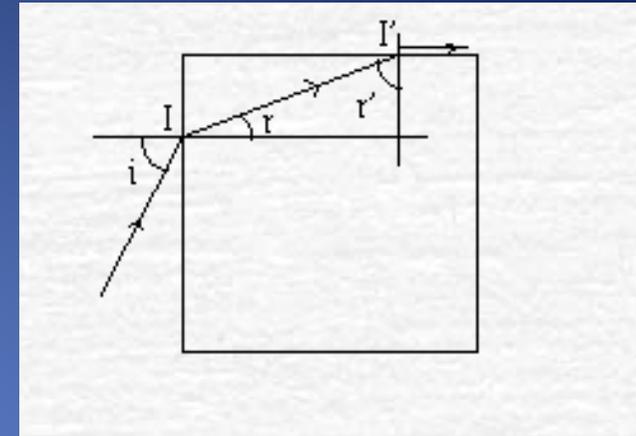


2.11 Exercices (lois de la réflexion et de la réfraction)

1. Un rayon de lumière dans l'air frappe un morceau de quartz à un angle d'incidence de 30° . L'angle de réfraction est de 20° . Quel est l'indice de réfraction du quartz ? (Rép. 1,46)
2. Soit un dioptre plan séparant un milieu d'indice n d'un milieu d'indice n' ($n' > n$). On cherche à ce que le rayon réfracté soit perpendiculaire au rayon réfléchi.
 - ✓ Exprimer l'angle d'incidence pour que cette condition soit vérifiée, en fonction de n et de n' .
 - ✓ On donne $n=1$ et $n'=1,5$. Calculer l'angle d'incidence et l'angle de réfraction. Vérifier l'orthogonalité des deux rayons.
(Rép. $\tan i = n'/n$; $i = 56,31^\circ$; $r=33,69^\circ$)
3. Montrer que la lumière n'est pas déviée par un passage à travers une vitre. Pour une vitre d'épaisseur 1 cm, que vaut le décalage latéral maximal ? Si la vitre n'a pas ses faces rigoureusement parallèles, que se passe-t-il ?

4. Un rayon lumineux traverse l'une des faces d'un cube en matière transparente sous une incidence de 45° puis rencontre une seconde face, perpendiculaire à la première.

En admettant que le plan d'incidence soit normal à ces deux faces et que le rayon sorte dans l'air en rasant la face de sortie, calculer l'indice de la substance du cube. (*Rép. 1,22*)

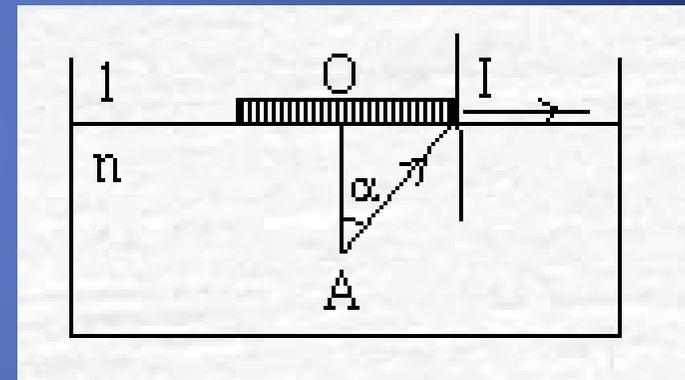


5. On fait flotter sur l'eau un disque opaque, de rayon $R=5$ cm, portant en son centre O une aiguille plongeant verticalement dans l'eau.

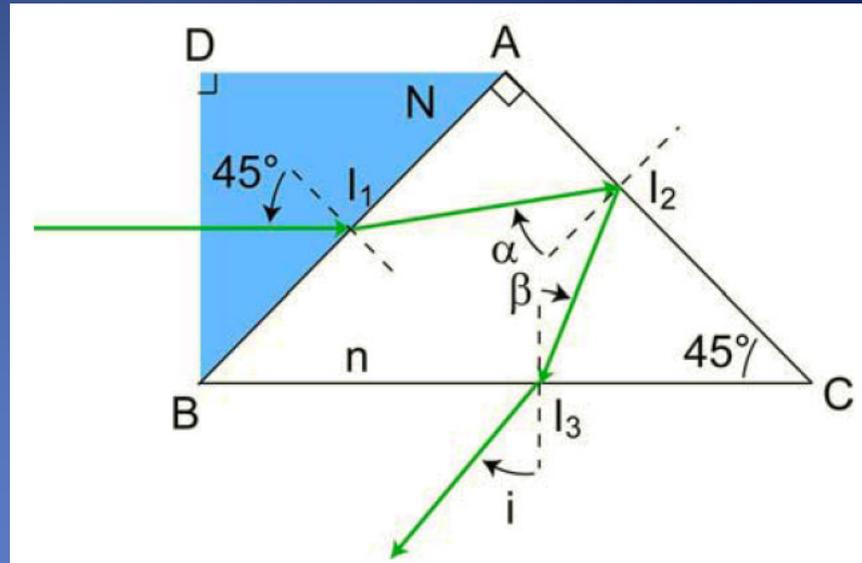
L'aiguille est invisible pour toute position de l'œil au-dessus du plan de la surface du liquide.

Quelle est au maximum la longueur OA de l'aiguille?

Indice : utiliser le phénomène de réflexion totale. (Rép. 4,4 cm)

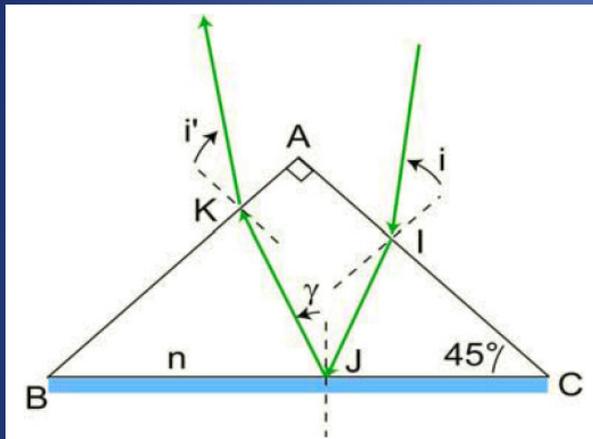
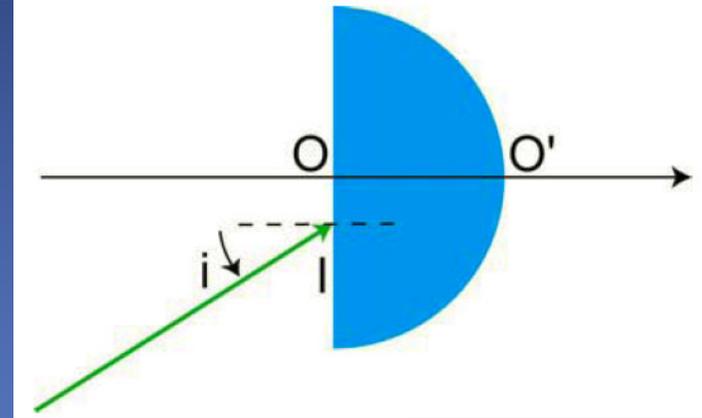


6. Deux morceaux de verre taillés sous forme de triangle rectangles et isocèles d'indices respectifs N et n ont leur face AB commune. Un rayon incident frappe la face BD sous une incidence normale, se réfracte en I_1 , se réfléchit en I_2 puis ressort en I_3 sous l'incidence i . les valeurs N et n sont telles que la réflexion est totale en I_2 .



- ✓ Ecrire la relation de Snell-Descartes aux points I_1 et I_2 .
- ✓ Quelles relations vérifient les angles r et α , α et β ?
- ✓ Quelle relation vérifient N et n pour que la réflexion soit limite en I_2 ? Calculer N , r , α , β et i pour $n=1.5$ quand cette condition limite est réalisée. On appelle N_0 cette nouvelle valeur limite de N pour que la réflexion soit totale en I_2 , N doit-il être plus grand ou plus petit que N_0 ?
- ✓ Ecrire la relation vérifiée par N et n pour que l'angle i soit nul. Que vaut N ?

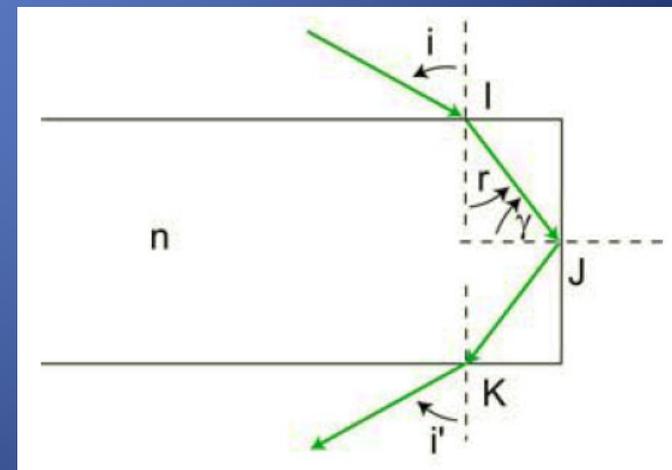
7. Un bloc de verre d'indice n a la forme d'un demi-cylindre de rayon R . Dans sa section droite qui est un demi-cercle de centre O , on envoie un rayon SI dont l'angle d'incidence est i . Exprimer $x=OI$ en fonction de n , R et i pour que le rayon qui a traversé le bloc de verre soit parallèle à SI .



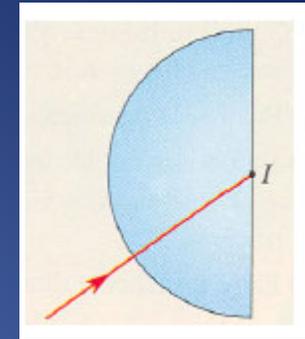
8. Un morceau de verre taillé sous la forme d'un triangle isocèle a la base argentée. Un rayon incident en I arrive sur le morceau de verre avec un angle d'incidence i , se réfléchit sur sa base en J avec un angle γ et ressort en K avec un angle i' . Démontrer que $i=i'$. Calculer en fonction de i la déviation due au morceau de verre.

9. On fabrique un parallélépipède de verre d'indice $n=1.5$. Un rayon arrive en I avec un angle d'incidence i , se réfléchit sur la deuxième face en J avec un angle γ et ressort par la troisième face au point K avec un angle i' .

- ✓ Etablir les relations entre les différents angles en I , J et K . Montrer que le rayon ne peut pas se réfracter en J et qu'il ne peut pas se réfléchir en K . Que vaut l'angle i' ?
- ✓ Calculer la déviation due au parallélépipède.



10. Un faisceau de lumière monochromatique est dirigé, comme l'indique le schéma ci-dessous, vers le centre I de la face plane d'un demi-cylindre de verre. Il pénètre dans le verre sans déviation et aborde, en I , la face de séparation du verre et de l'air.

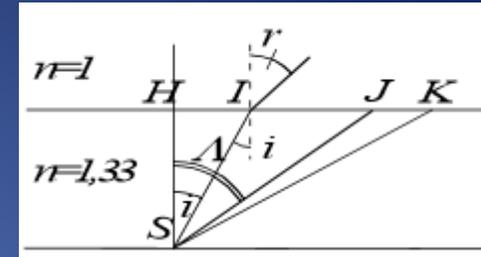


- ✓ Écrire la loi de Snell-Descartes pour le passage de la lumière du verre dans l'air.
- ✓ L'indice du verre vaut 1,5. L'angle de réfraction vaut 60° . Calculer l'angle d'incidence.
- ✓ Reproduire et compléter le schéma en dessinant le rayon réfracté. Pourquoi le rayon n'est-il pas dévié lorsqu'il pénètre dans le demi-cylindre ?

11. Le rayon d'un faisceau de lumière monochromatique issu d'un laser est dirigé sur une lame de verre. Pour cette lumière, l'indice du verre est 1,47.

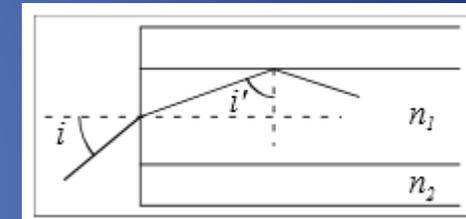
- ✓ Calculer l'angle de réfraction i_2 lorsque la lumière pénètre dans le verre avec un angle d'incidence $i_1 = 40^\circ$.
- ✓ Avec quel angle d'incidence i_3 la lumière atteint-elle la surface de sortie séparant le verre et l'air ?
- ✓ Calculer l'angle de réfraction lorsque la lumière sort du verre.

12. Un bassin de profondeur $h = 1,50$ m est entièrement rempli d'eau d'indice $n = 1,33$. L'indice de l'air sera pris égal à 1. Au fond du bassin, en son centre est placée une source ponctuelle S émettant de la lumière dans toutes les directions. On considère un rayon (SI) émis par S et frappant le dioptré en I .



A partir de quelle valeur Λ (lambda majuscule) de l'angle d'incidence y a-t-il réflexion totale ? Décrire ce qu'il se passe lorsque l'angle d'incidence croît. Quel est le rayon du disque éclairé qui se forme à la surface de l'eau ? (Rép. $1,71$ m)

13. Une fibre optique est formée d'une âme (ou cœur) en verre d'indice $n_1 = 1,66$ entourée d'une gaine en verre d'indice $n_2 = 1,52$. L'indice de l'air sera pris égal à 1. Un rayon lumineux est envoyé sur la face d'entrée de la fibre sous un angle d'incidence i . La lumière entre dans la fibre en subissant une réfraction. Puis si l'angle d'incidence est convenable, elle chemine dans la fibre grâce à une succession de réflexions totales (possibles car $n_1 > n_2$). Quelle condition l'angle d'incidence i doit-il vérifier pour qu'il en soit ainsi ? (Rép. $i < 41,85^\circ$)

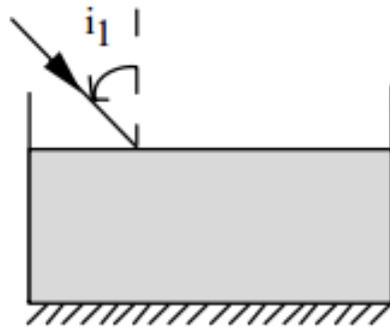


14. Association d'un dioptre et d'un miroir plan

On considère un bassin rempli d'un liquide d'indice $n = 4/3$ et de hauteur $h = 1.6$ m.

1- On place au fond du bassin un miroir plan horizontal

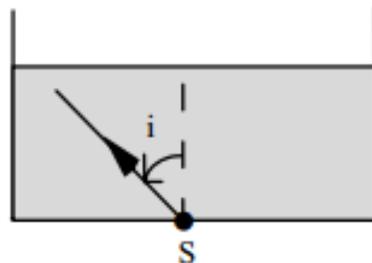
Soit un rayon lumineux incident faisant un angle d'incidence $i_1 = 30^\circ$ à la surface de l'eau.



1-a- Déterminer l'angle de réfraction i_2 .

1-b- Tracer la marche du rayon lumineux qui émerge du bassin après réflexion sur le miroir. Déterminer la déviation D du rayon lumineux.

2- On place au centre de la base du bassin une source lumineuse monochromatique S .



2-a- On observe à la surface de l'eau un disque lumineux. Expliquer le phénomène. Calculer le rayon R du disque.

2-b- Tracer la marche de deux rayons lumineux issus de la source correspondant aux angles d'incidence $j_1 = 30^\circ$ et $j_2 = 60^\circ$.

$$i_6 = -30^\circ$$

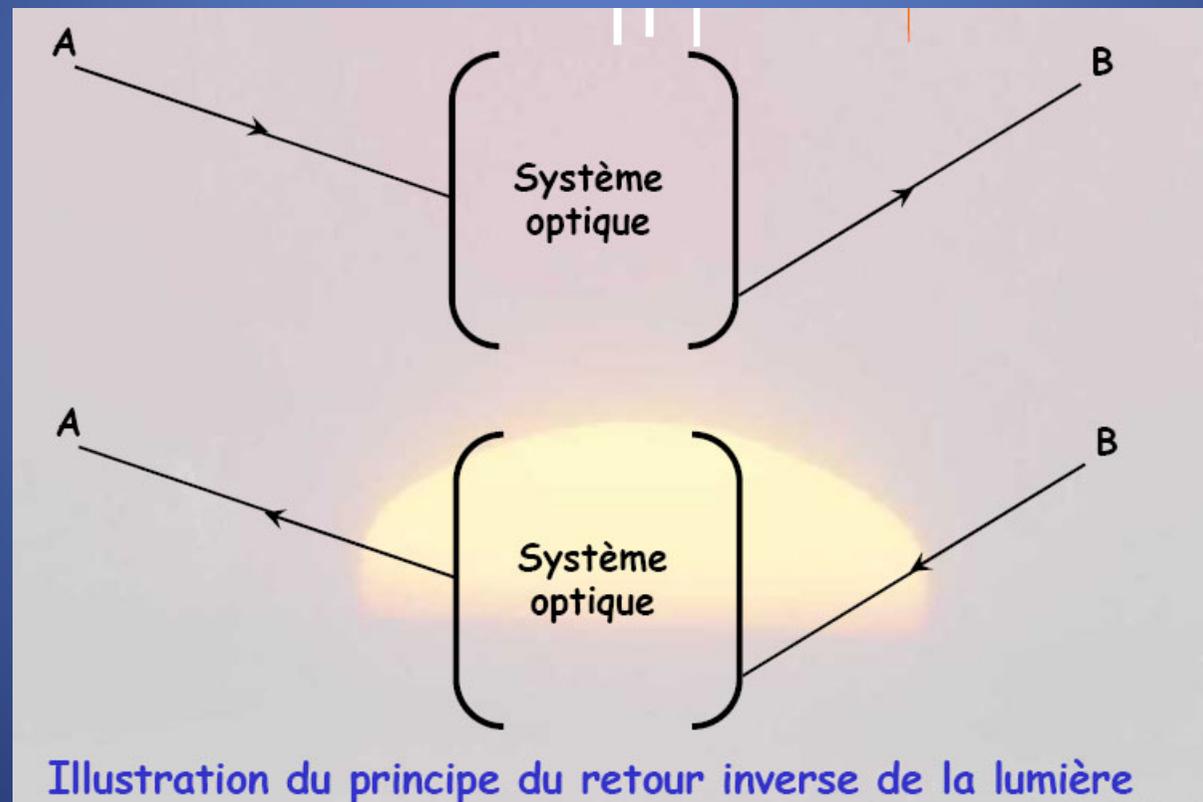
$$D = 120^\circ$$

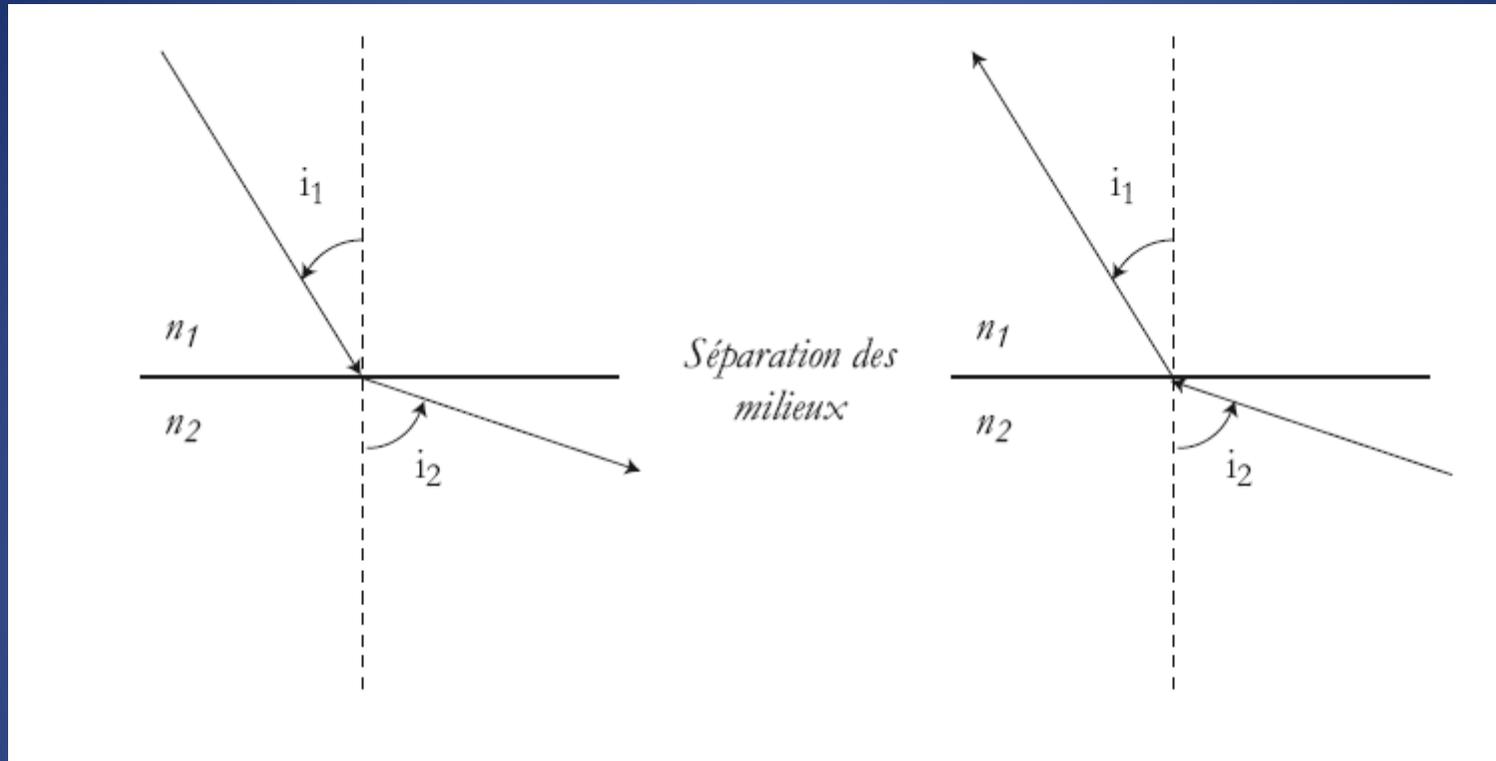
$$R = h \sin \lambda = 1.2 \text{ m}$$

3 Principe de retour inverse de la lumière

Le *principe de retour inverse* constitue le deuxième principe général de l'optique géométrique :

« Si la lumière suit un trajet quelconque d'un point A à un point B (y compris dans un système optique), alors *la lumière peut suivre exactement le trajet inverse* de B vers A. Autrement dit, le *sens* de parcours change, mais pas les *directions* (supports des rayons)».





Principe de retour inverse de la lumière dans le cas de la réfraction



4 Notion de chemin optique et principe de Fermat

4.1 Notion de chemin optique

4.1.1 Cas d'un milieu homogène

Dans un milieu homogène, *le chemin optique* de la lumière pour aller d'un point A vers un point B, noté $L_{(A,B)}$ ou [AB], est défini comme étant un *nombre algébrique (c'est-à-dire muni d'un signe) proportionnel au temps mis par le rayon pour aller de A à B (ce temps vaut la distance divisée par la vitesse)*, le coefficient de proportionnalité α étant tel que $L_{(A,B)}$ est égal à la distance algébrique (c'est-à-dire munie d'un signe) AB pour un parcours d'une même durée dans le vide.

Si on appelle v la célérité de la lumière dans le milieu, et c la célérité de la lumière dans le vide, on a donc :

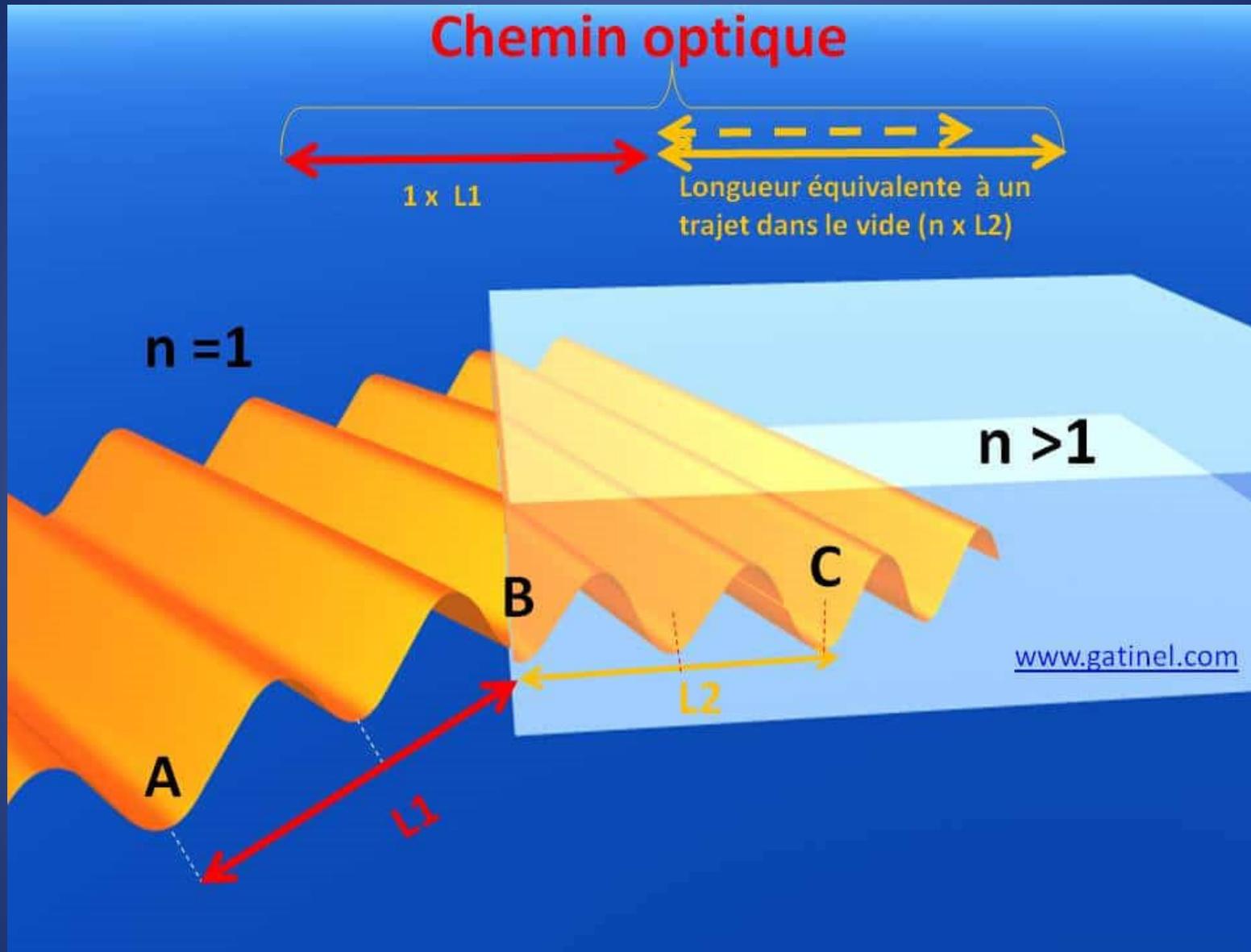
$$L_{(A,B)} = \alpha t_{AB} = \alpha \frac{\overline{AB}}{v} \quad \text{et} \quad \alpha \frac{\overline{AB}}{c} = \overline{AB}$$

Et le coefficient de proportionnalité α est donc égal à la célérité c ; par conséquent, on a :

$$L_{(A,B)} = \frac{c}{v} \overline{AB} \equiv n \overline{AB} = n \vec{u} \cdot \overrightarrow{AB}$$

où l'on a introduit l'*indice de réfraction absolu du milieu* n et où le vecteur u désigne un vecteur unitaire orienté porté par le rayon.

Chemin optique



$L_{(A,B)}$ est égal à la distance algébrique (c'est-à-dire munie d'un signe) AB pour un parcours d'une même durée dans le vide.

Remarque : distances orientées

En optique, on utilise souvent des *distances algébriques* (dites encore *orientées*) ; elles sont généralement représentées par un couple de points surmonté d'une barre, comme par exemple :

$$\overline{AB}$$

Il s'agit de *distances munies d'un signe*.

Le signe des distances dans une direction fixée est déterminé par le choix d'une *orientation*.

Une distance orientée AB est alors positive si le premier point qui la délimite, c'est-à-dire A, est situé « avant » le second point, c'est-à-dire B.

En optique, le *signe positif* est généralement pris comme étant le *sens de parcours de la lumière*.



Les chemins optiques s'ajoutent algébriquement ; par exemple, le chemin optique pour la lumière dans un milieu homogène sur le trajet A->B suivi du trajet B->C est tel que :

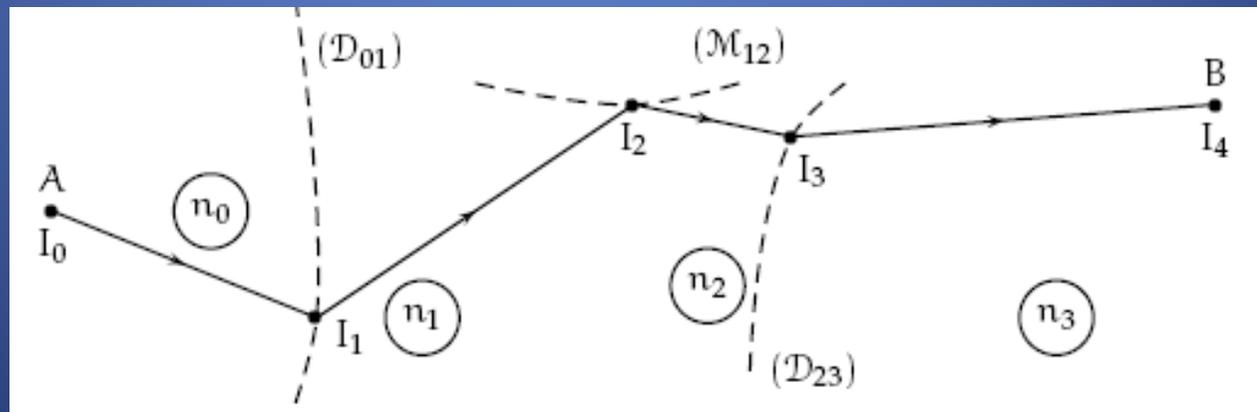
$$L_{(A,C)} = L_{(A,B)} + L_{(B,C)}$$

4.1.2 Succession de milieux homogènes

Plus généralement, dans le cas d'une succession de milieux homogènes, d'indices successifs n_k , $k=0, \dots, N$, deux milieux consécutifs d'indices n_k et n_{k+1} étant séparés par les dioptries ($\mathcal{D}_{k,k+1}$) ou les miroirs ($\mathcal{M}_{k,k+1}$), on peut écrire le chemin optique :

$$L_{(A,B)} = \sum_{k=0}^N n_k \overline{I_k I_{k+1}}$$

sous réserve de noter $I_0 = A$ et $I_N = B$ (sur la figure $N = 3$ et $n_1 = n_2$).



4.1.3 Cas d'un milieu inhomogène

Dans le cas d'un *milieu non homogène*, où l'indice optique varie de point en point, on peut toujours considérer deux points infiniment voisins du milieu, M et M' et distants d'une distance ds.

Le chemin optique séparant ces deux points est alors :

$$dL = n(M).ds ;$$

dL est l'*élément unitaire infinitésimal de chemin optique*.

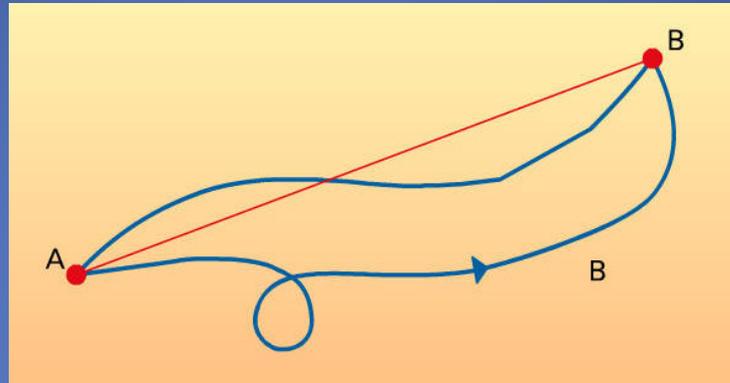
Pour trouver le chemin optique $L_{(A,B)}$ séparant deux points A et B sur cette courbe, il suffit de faire la somme intégrale de tous les éléments de chemin optique dL, c'est-à-dire de calculer une *intégrale curviligne* sur la coordonnée curviligne s paramétrant le *chemin C(A,B) qui relie les points A et B* :

$$\begin{aligned} L_{(A,B)} &= \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^N dL_{(I_k, I_{k+1})} = \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^N n_k ds_k = \int_{M \in C(A,B)} n(M) ds \\ &= \int_{M \in C(A,B)} n(M) \vec{u}_t(M) \cdot d\vec{r} \end{aligned}$$

où l'on a noté le vecteur unitaire tangent au chemin C(A,B) au point M par : $\vec{u}_t(M)$

4.2 Énoncé du principe de Fermat

« La lumière se propage d'un point A à un point B sur une trajectoire telle que le chemin optique (et donc la durée du parcours) soit **stationnaire** (c'est-à-dire présente un extremum, minimum ou maximum) ».

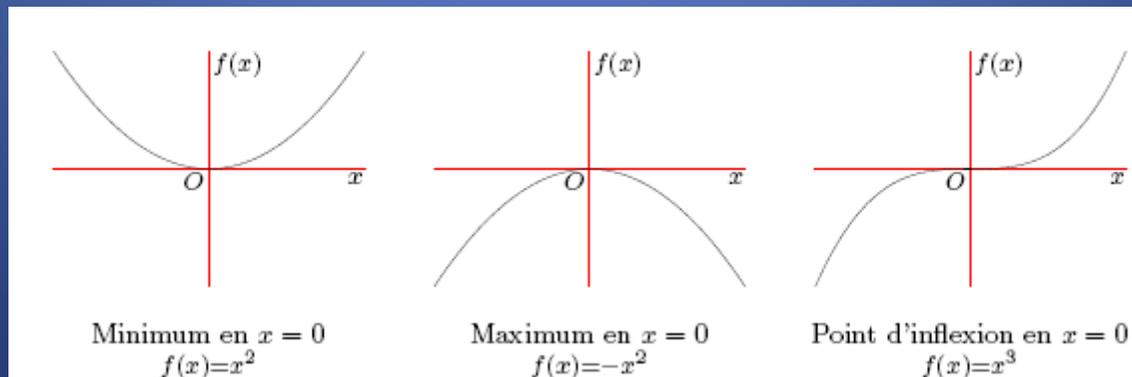


Nous ne démontrerons pas cette formulation, mais nous allons expliquer le mot **stationnaire**.

Pour une **fonction $f(x)$ d'une variable**, on dit que la fonction est **stationnaire** en $x = x_0$ si :

$$\left. \frac{df}{dx} \right|_{x=x_0} = 0.$$

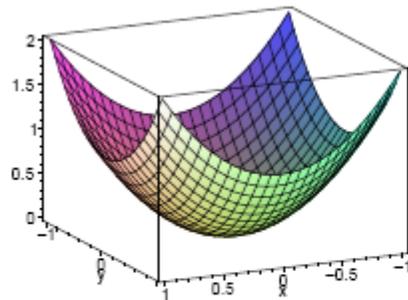
La figure ci-dessous représente les 3 cas possibles.



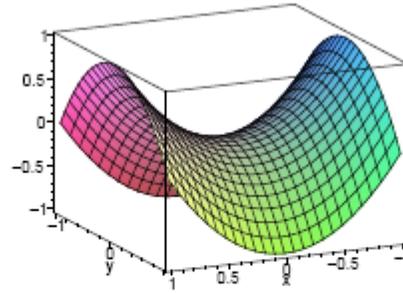
Pour une *fonction $f(x,y)$ de deux variables*, on dit que la fonction est *stationnaire* en (x_0, y_0) si :

$$\left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{(x,y)=(x_0,y_0)} = \left. \frac{\partial f}{\partial y} \right|_{(x,y)=(x_0,y_0)} = 0.$$

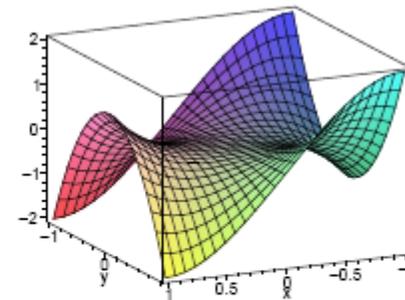
Autrement dit, la fonction $f(x,y)$ est stationnaire par rapport aux variations de chacune des variables x et y , c'est-à-dire que $f(x, y_0)$, considérée comme fonction de x , est stationnaire en x_0 et $f(x_0, y)$, considérée comme fonction de y , est stationnaire en y_0 . La figure ci-dessous représente quelques situations possibles.



Minimum en $(0,0)$
 $f(x,y)=x^2+y^2$



Col en $(0,0)$
 $f(x,y)=x^2-y^2$



Selle de singe en $(0,0)$
 $f(x,y)=x(x^2-3y^2)$

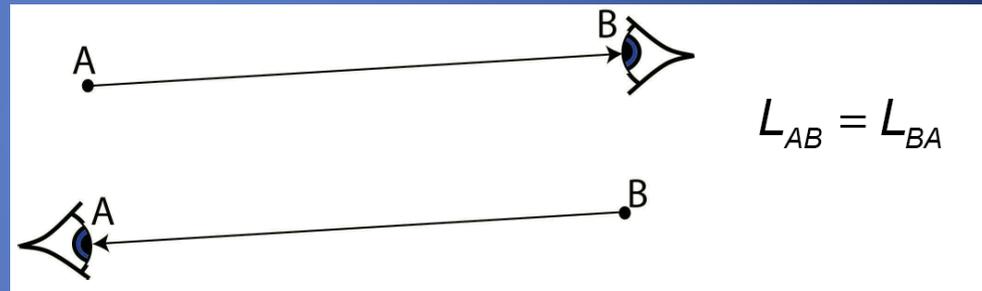
Une première conséquence du principe de Fermat est la *propagation rectiligne des rayons lumineux* dans les milieux homogènes. En effet, dans un milieu homogène, le temps de parcours est proportionnel à la longueur du trajet, et le chemin le plus court pour aller d'un point à un autre est la ligne droite.

Propagation dans un milieu homogène

$$n(M) = n = C^{te}$$



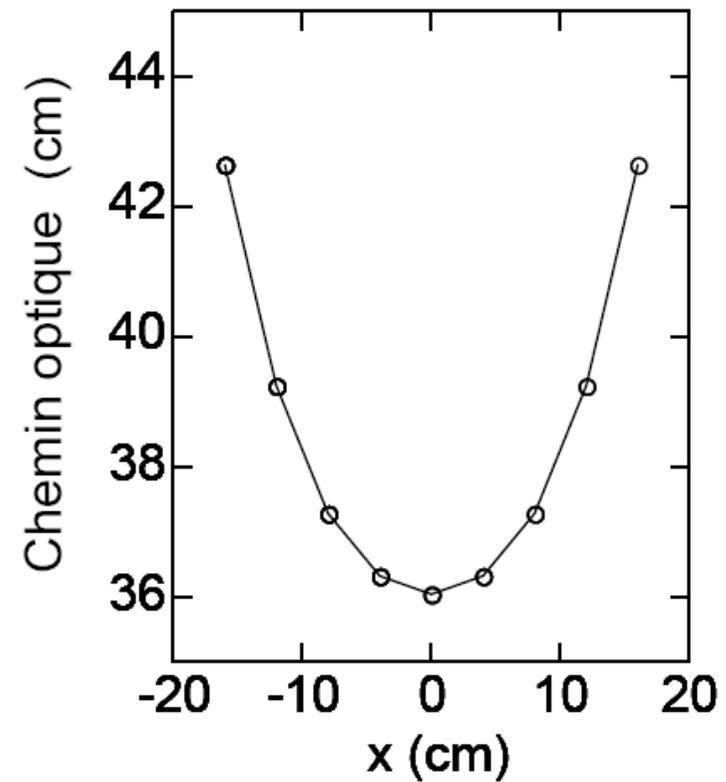
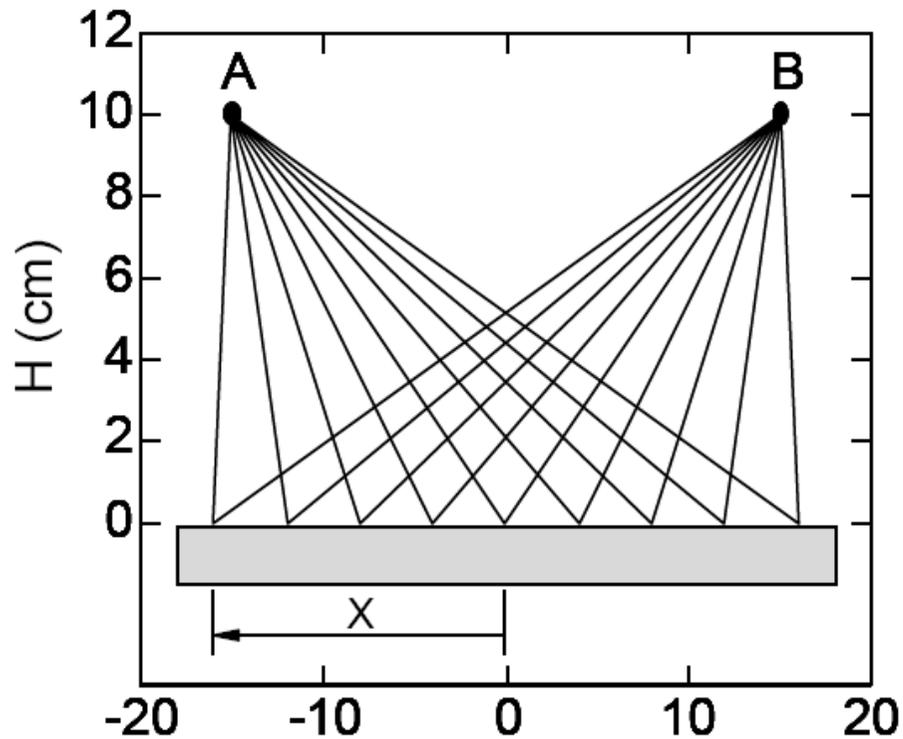
Une deuxième conséquence de ce principe est que le trajet suivi par la lumière pour aller d'un point à un autre ne dépend pas du sens de propagation de la lumière (*principe de retour inverse de la lumière*).



En fait, le *principe de Fermat permet de retrouver toutes les lois de l'optique géométrique*. Il peut servir de postulat général pour la théorie de l'optique géométrique.

Il permet en particulier de *démontrer les lois de la réflexion et de la réfraction*.

4.3 Principe de Fermat et lois de la réflexion



Pour passer de A à B, la lumière suit le chemin prévu par la loi de la réflexion, passant par $x=0$ qui correspond bien au minimum du chemin optique

http://uel.unisciel.fr/physique/optigeo/optigeo_ch01/co/simuler_ch01_01.html

4.3.1 Point de vue géométrique

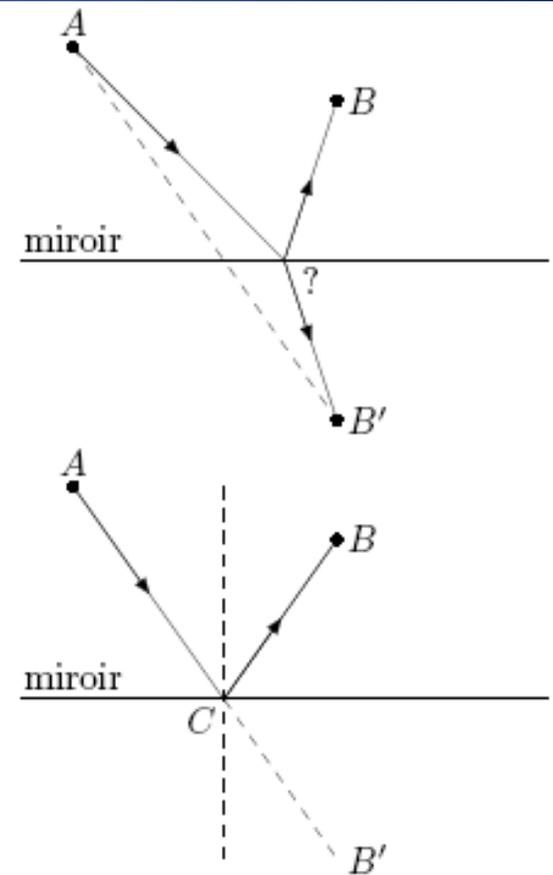
Soit B' le symétrique de B par rapport au miroir.

La longueur du trajet « $A-?-B$ » est égale à celle du trajet « $A-?-B'$ ».

Le trajet le plus court est réalisé lorsque « ? » est aligné avec A et B' .

Le trajet solution est « $A - C - B$ », où C est le point d'intersection du miroir et de (AB') .

Des propriétés élémentaires des angles permettent alors d'affirmer que **les angles que forment les rayons lumineux avec la normale au miroir sont égaux.**



4.3.2 Point de vue analytique

Le chemin optique total entre A et B est fonction de la position du point d'incidence C (repérée par x) :

$$L_{(A,B)} = n(a + b) = n \left(\sqrt{x^2 + c^2} + \sqrt{(d-x)^2 + c^2} \right)$$

Le chemin est extremum pour une position de C telle que :

$$\frac{dL}{dx} = 0$$

On trouve par un calcul direct :

$$\frac{dL}{dx} = \frac{x}{\sqrt{x^2 + c^2}} - \frac{d-x}{\sqrt{(d-x)^2 + c^2}}$$

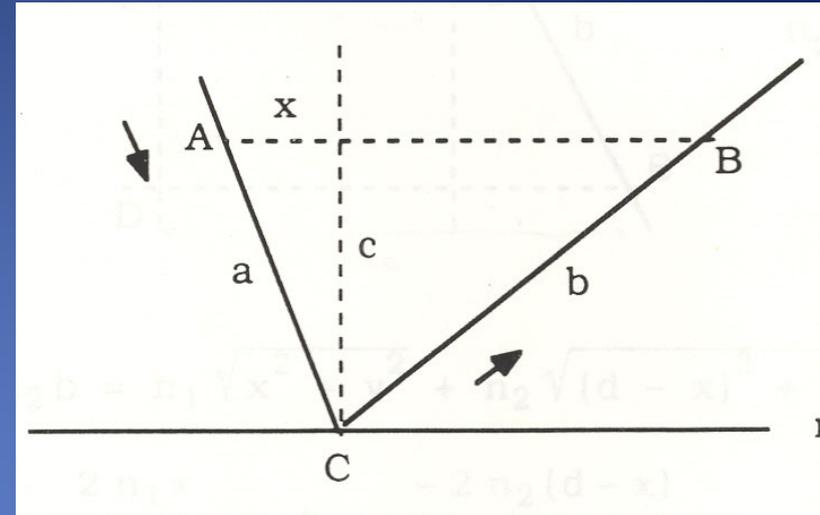
La position $x=x^*$ de C qui assure l'extremum est donc telle que :

$$\begin{aligned} 0 &= \left. \frac{dL}{dx} \right|_{x=x^*} = \frac{x^*}{\sqrt{x^{*2} + c^2}} - \frac{d-x^*}{\sqrt{(d-x^*)^2 + c^2}} \Leftrightarrow \frac{x^*}{\sqrt{x^{*2} + c^2}} = \frac{d-x^*}{\sqrt{(d-x^*)^2 + c^2}} \\ \Leftrightarrow x^* \sqrt{(d-x^*)^2 + c^2} &= (d-x^*) \sqrt{x^{*2} + c^2} \Leftrightarrow x^{*2} \left((d-x^*)^2 + c^2 \right) = (d-x^*)^2 \left(x^{*2} + c^2 \right) \\ \Leftrightarrow x^{*2} c^2 &= (d-x^*)^2 c^2 \Leftrightarrow x^{*2} = (d-x^*)^2 \Leftrightarrow x^* = \pm (d-x^*) \end{aligned}$$

qui a pour unique solution $x^*=d/2$, ce qui implique l'égalité des angles d'incidence et de réflexion.

Remarque : l'extremum est bien un minimum puisque :

$$\frac{d^2L}{dx^2} = \frac{c^2}{(x^2 + c^2)^{3/2}} + \frac{c^2}{\left((d-x)^2 + c^2 \right)^{3/2}} > 0$$

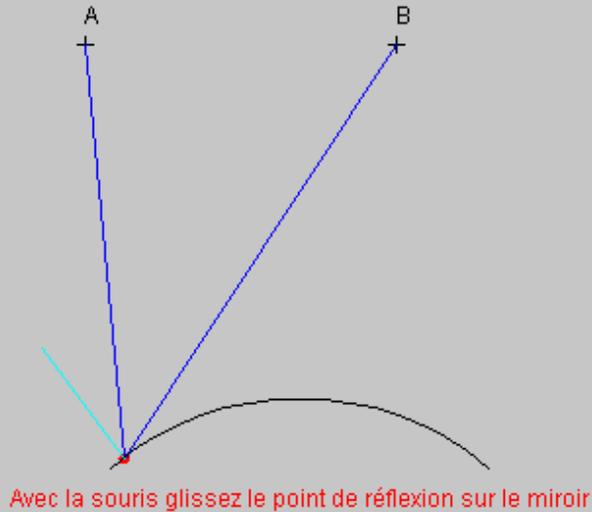


Concave Convexe Solution

$l_1 = 31.429$

Chemin optique = 46.29041

$l_2 = 70.411$



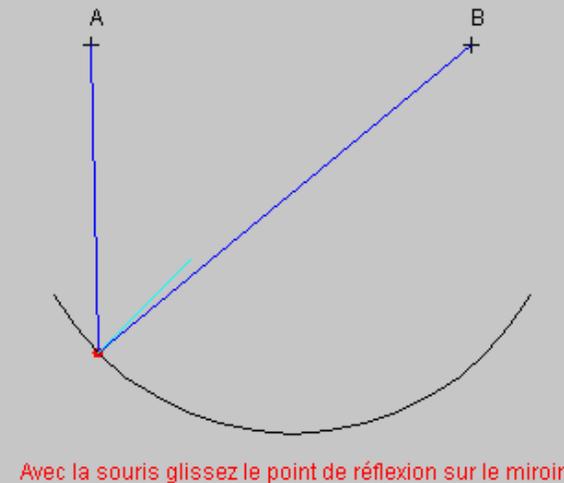
Réflexion sur un miroir sphérique convexe : l'extremum est un minimum

Concave Convexe Solution

$l_1 = -46.34$

Chemin optique = 42.87877

$l_2 = 5.7916$



Réflexion sur un miroir sphérique concave : l'extremum est un maximum

4.4 Principe de Fermat et lois de la réfraction

4.4.1 Réfraction : métaphore du nageur

Un athlète doit partir de la plage et rejoindre une bouée dans l'eau.

Il essaie deux stratégies :

- (1) aller en ligne droite,
- (2) courir à l'aplomb de la bouée, et nager perpendiculairement au rivage.

C'est la stratégie 2 qui est la plus rapide, car il nage plus lentement qu'il ne court.

Mais la stratégie optimale consiste à suivre la loi de Snell-Descartes (trajectoire en trait plein).

La trajectoire la plus rapide est telle que :

$$(1/v_1)\sin \vartheta_1 = (1/v_2)\sin \vartheta_2.$$

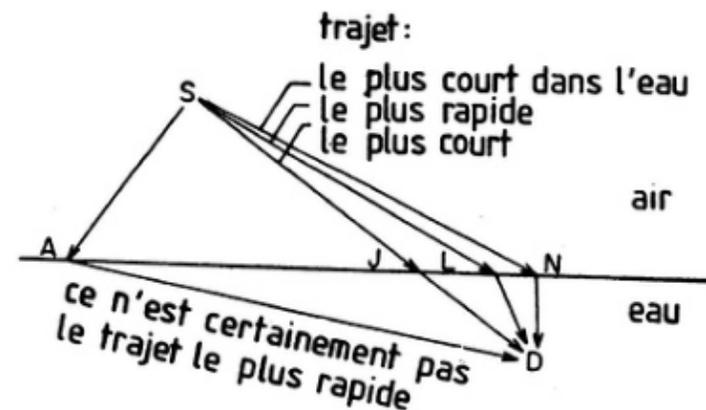
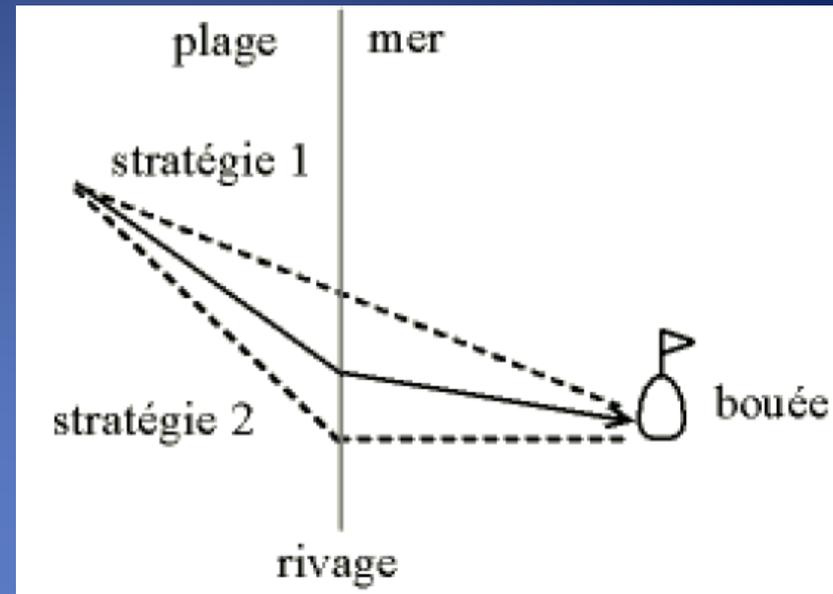


FIGURE 1. Trouver quel est le trajet de moindre temps pour la lumière revient à déterminer le trajet qui permettra au maître-nageur en faction sur la plage de sauver au plus vite une jeune fille en train de se noyer. Le trajet le plus court oblige à nager trop longtemps ; le trajet qui minimise la distance parcourue dans l'eau oblige à courir trop longtemps sur le sable. Le trajet de moindre temps réalise un compromis entre les deux.

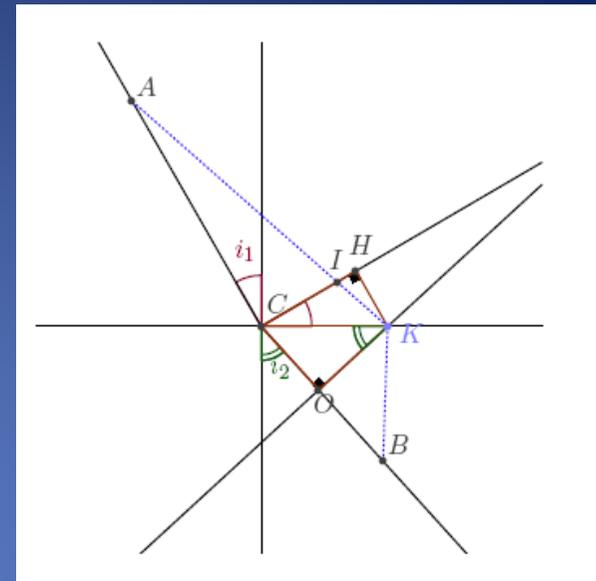
4.4.2 Point de vue géométrique

Fermat développe la *démonstration géométrique* suivante :
Considérons le trajet effectivement suivi « A-C-B », qui est tel que :

$$n_1 \sin(i_1) = n_2 \sin(i_2) ;$$

nous allons démontrer qu'*un autre trajet (le trajet « A-K-B ») est nécessairement plus long.*

Le point O est le projeté orthogonal de K sur (BC), H le projeté orthogonal de K sur la droite perpendiculaire à (AC) passant par C, et I le point d'intersection des droites (AK) et (CH).



Le trajet « A-C-B » peut se décomposer en trois morceaux : AC, CO et OB, et le trajet « A-K-B » en : AI, IK et KB. Nous allons comparer la durée de ces morceaux deux à deux :

1. Le premier morceau AI est plus grand en distance que AC, et comme il s'agit du même milieu, la vitesse de la lumière est la même et il est donc aussi plus long en temps.
2. De même le troisième morceau KB est plus long en temps que OB.
3. Il nous reste à comparer les deuxièmes morceaux, IK et CO : IK est plus grand que HK en distance, et donc plus long en temps. Comparons HK et CO : $HK = CK \cdot \sin(i_1)$ et $CO = CK \cdot \sin(i_2)$.

$$\text{Or : } \frac{\sin(i_1)}{\sin(i_2)} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2} \text{ Donc, } \frac{HK}{CO} = \frac{v_1}{v_2}, \text{ d'où } \frac{HK}{v_1} = \frac{CO}{v_2}.$$

On en déduit que les trajets HK et CO sont égaux en durée, et par conséquent que le deuxième morceau IK est plus long en temps que le deuxième morceau CO.

Chacun des morceaux du trajet « A-K-B » étant plus long que son homologue du trajet « A-C-B », on peut conclure *la trajectoire suivie est bien celle qui minimise le temps de parcours.*

4.4.3 Point de vue analytique

Le chemin optique total entre A et B est fonction de la position du point d'incidence C :

$$L_{(A,B)} = n_1 a + n_2 b = n_1 \sqrt{x^2 + y^2} + n_2 \sqrt{(d-x)^2 + z^2}$$

Le chemin est extremum pour une position de C telle que :

$$\frac{dL}{dx} = 0$$

On trouve par un calcul direct :

$$\frac{dL}{dx} = \frac{n_1 x}{\sqrt{x^2 + y^2}} - \frac{n_2 (d-x)}{\sqrt{(d-x)^2 + z^2}}$$

La position $x=x^*$ de C qui assure l'extremum est donc telle que :

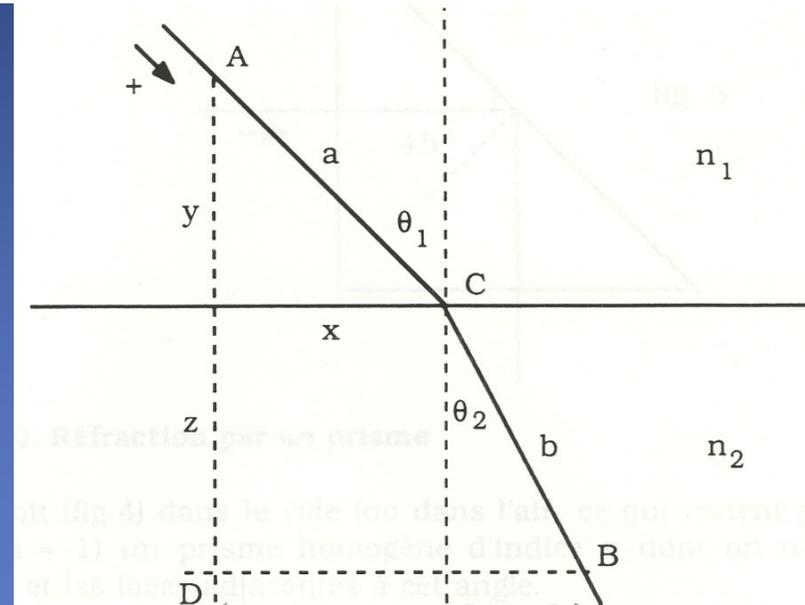
$$0 = \left. \frac{dL}{dx} \right|_{x=x^*} = \frac{n_1 x^*}{\sqrt{x^{*2} + y^2}} - \frac{n_2 (d-x^*)}{\sqrt{(d-x^*)^2 + z^2}} \Leftrightarrow n_1 \frac{x^*}{a} = n_2 \frac{d-x^*}{b}$$

$$\Leftrightarrow n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

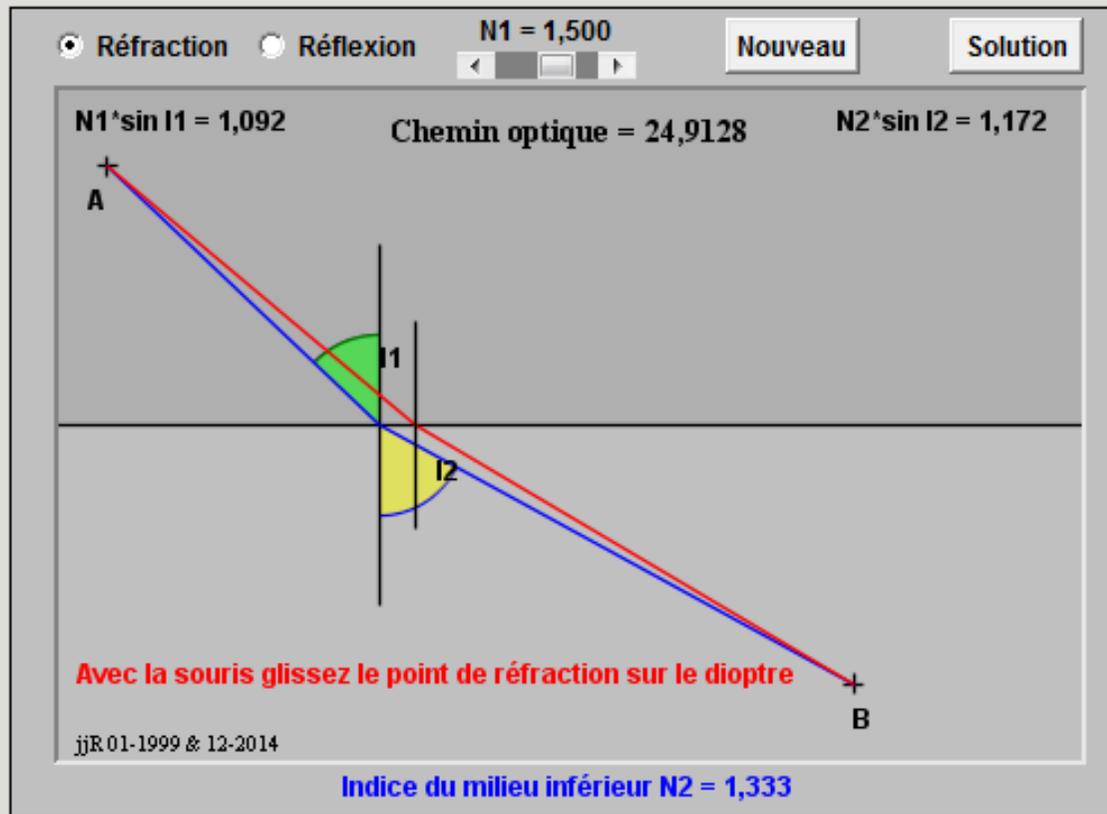
On retrouve donc bien la loi de Snell-Descartes.

Remarque : l'extremum est bien un minimum puisque :

$$\frac{d^2 L}{dx^2} = \frac{n_1 y^2}{(x^2 + y^2)^{3/2}} + \frac{n^2 z^2}{((d-x)^2 + z^2)^{3/2}} > 0$$



Principe de Fermat



Cliquez [ici](#) pour obtenir des informations sur le principe de Fermat

Dioptré et miroir plans :

Choisir le mode **réfraction** ou **réflexion**.

La position du point B est choisie de manière aléatoire par le programme lors de chaque clic sur le bouton [Nouveau].

Le programme affiche la valeur totale du **chemin optique** ainsi que les valeurs des produits $n \cdot \sin(i)$ (ou les valeurs des angles d'incidence) pour chaque rayon.

En mode réfraction, il est possible de modifier l'**indice** du milieu supérieur. Cet indice est compris entre 1 et 1,75. La couleur du milieu est purement conventionnelle.

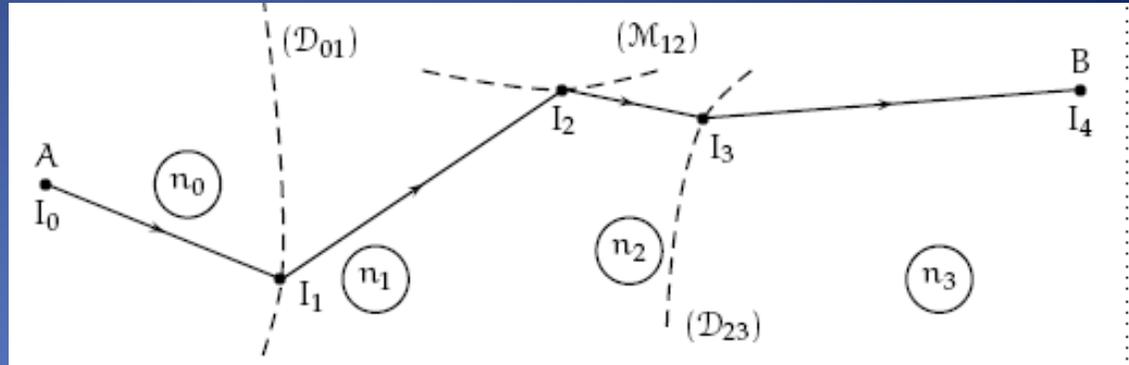
Avec la souris, modifiez la position du point de réfraction (ou de réflexion) du rayon allant de A vers B pour rendre minimal le chemin optique.

Vérifiez que le minima du chemin optique correspond à l'égalité des produits $n \cdot \sin(i)$ (ou à l'égalité des angles d'incidence et de réflexion). Vérifiez que pour la réfraction si les deux indices sont identiques, la propagation est rectiligne.

En cliquant sur le bouton [Solution] vous lancez le calcul du minima du chemin optique par le programme.

4.5 Principe de Fermat et lois de la réflexion et de la réfraction, analyse générale

Reprenons le cas général d'une *succession de milieux homogènes*, d'indices successifs n_k , $k=0, \dots, N$, deux milieux consécutifs d'indices n_k et n_{k+1} étant *séparés par des dioptrés* $(D_{k,k+1})$ *ou des miroirs* $(M_{k,k+1})$.



La nature rectiligne des trajets $I_k I_{k+1}$ étant imposée dans chaque milieu homogène, le principe de Fermat impose seulement le choix des points intermédiaires I_k ($0 < k < N$) de réfraction ou de réflexion des rayons lumineux sur les différents dioptrés et miroirs.

Ce choix doit vérifier : $0 = dL_{(A,B)}$ avec $L_{(A,B)} = \sum_{k=0}^N n_k \overline{I_k I_{k+1}} = \sum_{k=0}^N n_k \vec{u}_k \cdot \overline{I_k I_{k+1}}$

Comme : $d(\vec{u}_k \cdot \overline{I_k I_{k+1}}) = \vec{u}_k \cdot (d\overline{OI_{k+1}} - d\overline{OI_k})$

Puisque : $d\vec{u}_k$ est \perp à \vec{u}_k et donc à $\overline{I_k I_{k+1}}$

(un vecteur unitaire vérifiant toujours : $\vec{u}_k \cdot \vec{u}_k = 1$ et donc : $\vec{u}_k \cdot d\vec{u}_k = 0$).

On peut donc regrouper la condition issue du principe de Fermat sous la forme :

$$\sum_{k=1}^{N-1} d\overline{OI_k} \cdot (n_k \vec{u}_k - n_{k+1} \vec{u}_{k+1}) = 0$$

Cette condition n'est possible, pour tout déplacement infinitésimal arbitraire du point I_k sur le dioptre ($D_{k,k+1}$) ou sur le miroir ($M_{k,k+1}$), que si le vecteur :

$$\vec{n}_k \vec{u}_k - n_{k+1} \vec{u}_{k+1}$$

est normal à la surface de ce dioptre ou de ce miroir.

En notant enfin : $\vec{g}_{k,k+1}$ un vecteur unitaire normal à cette surface, on a donc :

$$\vec{g}_{k,k+1} \times (\vec{n}_k \vec{u}_k - n_{k+1} \vec{u}_{k+1}) = 0 \quad \text{et donc} \quad \vec{g}_{k,k+1} \times n_k \vec{u}_k = \vec{g}_{k,k+1} \times n_{k+1} \vec{u}_{k+1}$$

Cette relation, qui introduit l'*invariant de propagation* : $\vec{g} \times n\vec{u}$

n'est autre que la loi de Snell–Descartes de la réflexion ou de la réfraction.

En effet, comme : $\vec{u}_{k+1} \cdot (\vec{g}_{k,k+1} \times \vec{u}_k) = \vec{u}_{k+1} \cdot (\vec{g}_{k,k+1} \times \vec{u}_{k+1}) = \vec{g}_{k,k+1} \cdot (\vec{u}_{k+1} \times \vec{u}_{k+1}) = 0$

elle affirme d'abord que le vecteur \vec{u}_{k+1} est *orthogonal* à : $\vec{g}_{k,k+1} \times \vec{u}_k$, donc *à la normale au plan d'incidence* défini par le rayon incident \vec{u}_k et la normale $\vec{g}_{k,k+1}$ au point d'incidence, et donc la *première loi de Snell-Descartes* :

Le rayon réfléchi et le rayon réfracté sont contenus dans le plan d'incidence, défini par le rayon incident et la normale au dioptre ou au miroir au point d'incidence.

De plus, le vecteur invariant :

$$\vec{g}_{k,k+1} \times n_k \vec{u}_k$$

a pour norme :

$$n_k \sin i_k$$

où i_k est l'angle (non orienté) formé entre les vecteurs :

$$\vec{g}_{k,k+1} \text{ et } \vec{u}_k$$

on retrouve donc bien la *seconde loi de Snell-Descartes* :

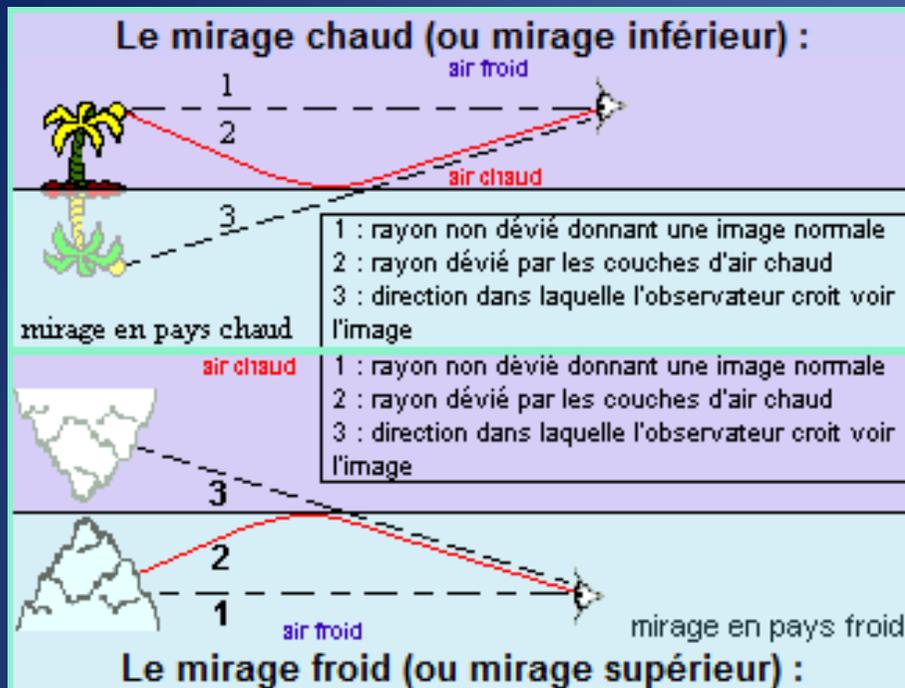
Dans le cas de la réfraction, le rayon lumineux traverse la normale et les angles formés avec celle-ci par les rayons incident (i_k) et réfracté (i_{k+1}) vérifient la relation :

$$n_k \sin i_k = n_{k+1} \sin i_{k+1}$$

Dans le cas de la réflexion, le rayon lumineux traverse également la normale et est le symétrique relativement à celle-ci du rayon incident puisque :

$$i_k = i_{k+1}$$

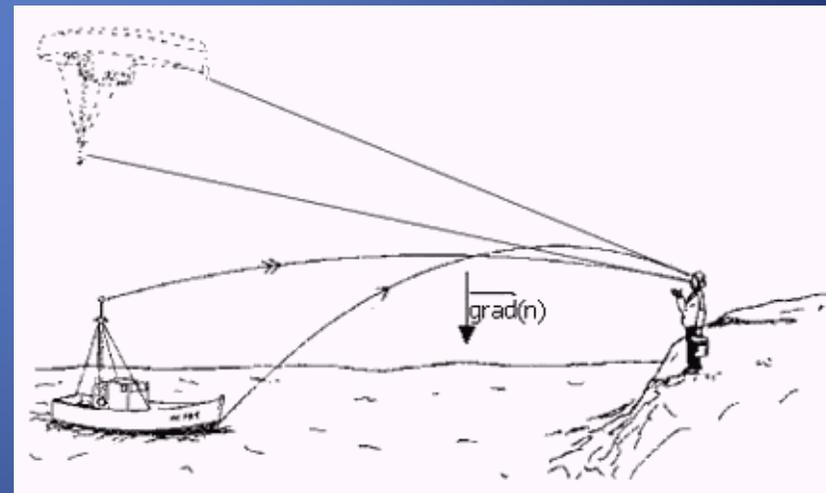
4.6 Propagation courbe de la lumière dans un milieu inhomogène, phénomène de mirage



Lorsque la température du sol est différente de celle de l'atmosphère, il existe au voisinage du sol une couche d'air dans laquelle l'indice de réfraction varie rapidement, rendant le *milieu inhomogène*, et entraînant pour les rayons lumineux une *courbure* qui déforme l'image des objets situés au ras du sol. C'est le *phénomène de mirage*.

Si le *sol* est *plus chaud que l'air*, la *courbure est dirigée vers le haut* et les objets se doublent d'une image renversée laissant croire à un reflet sur un plan d'eau alors qu'en fait c'est le ciel qui donne cet effet.

Dans les régions polaires, où le *sol* est *plus froid que l'air*, les rayons lumineux sont *courbés vers le bas*, ce qui fait qu'un objet situé au sol semble flotter en l'air. Ce phénomène rend possible la vision d'objets situés au-delà de l'horizon.

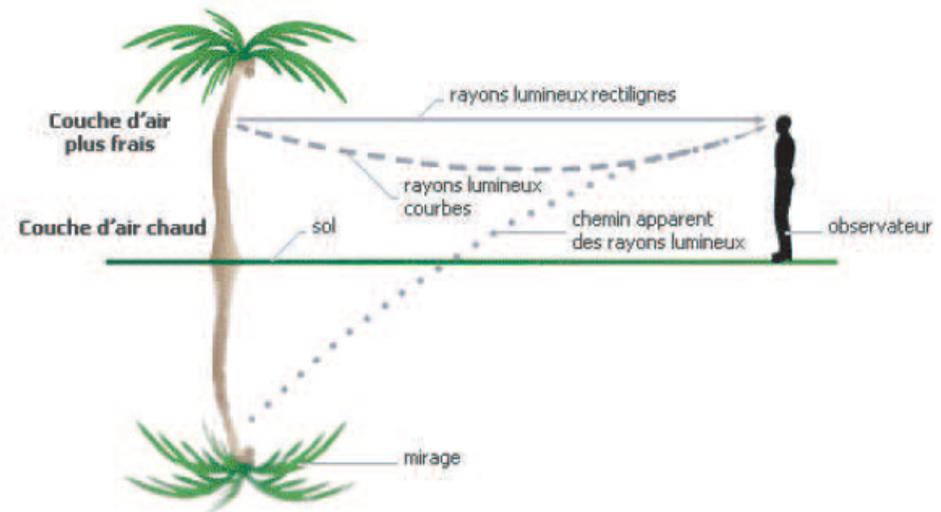


Mirage optique

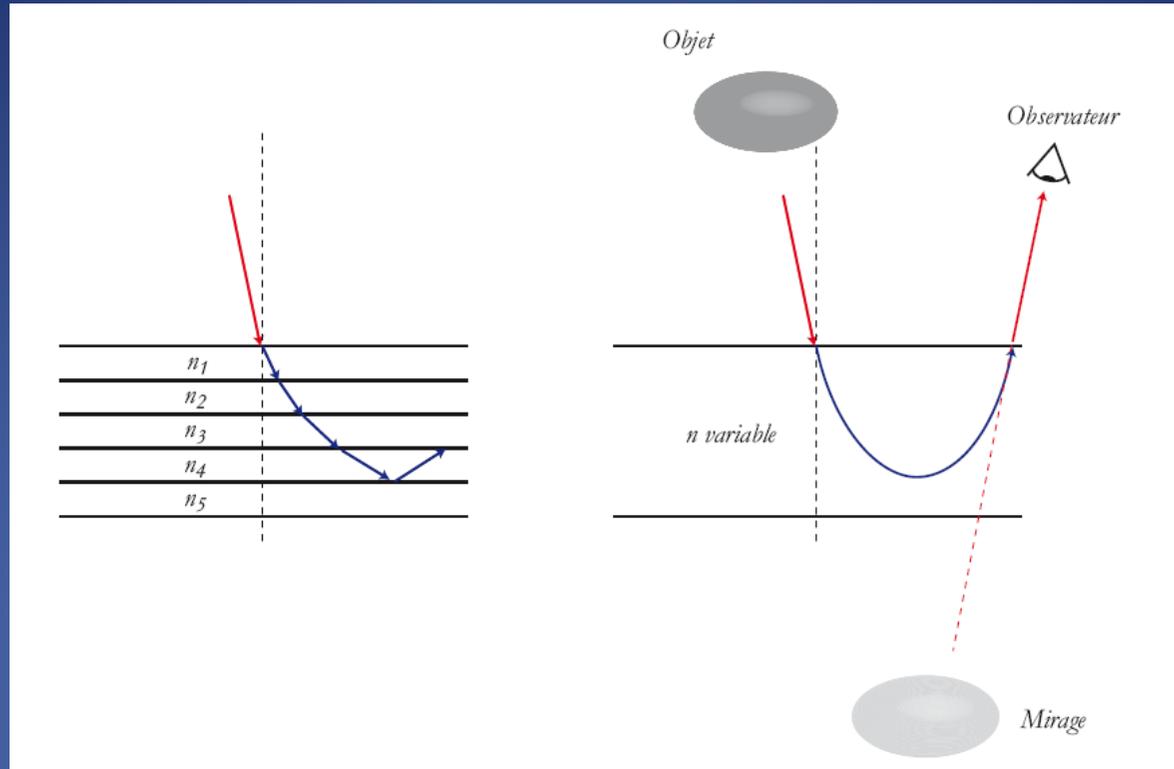


Mirage inférieur (encore appelé mirage chaud) dans le désert du Namib, en Afrique australe.

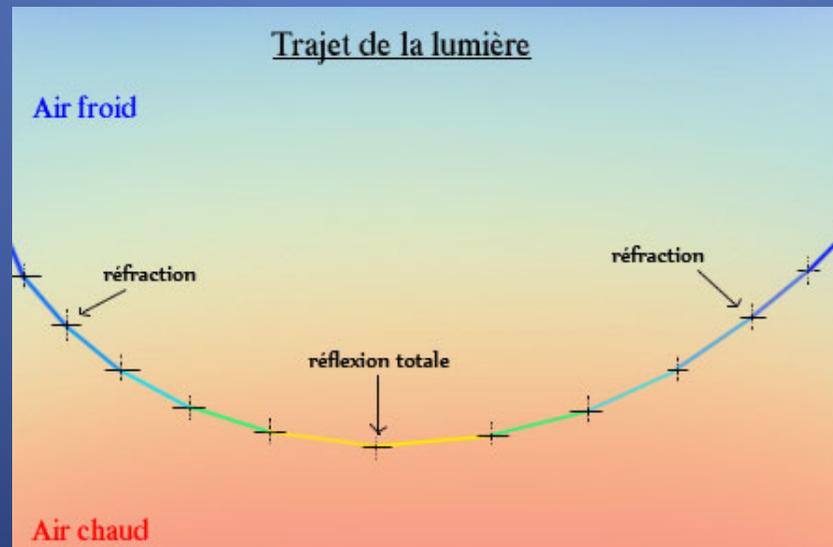
Mirage optique



Le mirage n'est pas une illusion !

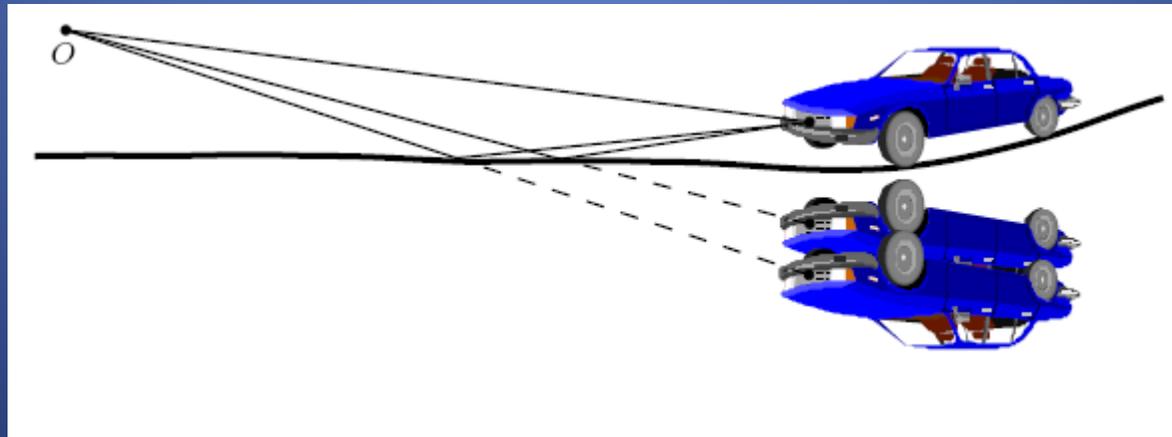


Propagation dans les milieux inhomogènes et phénomène de mirage

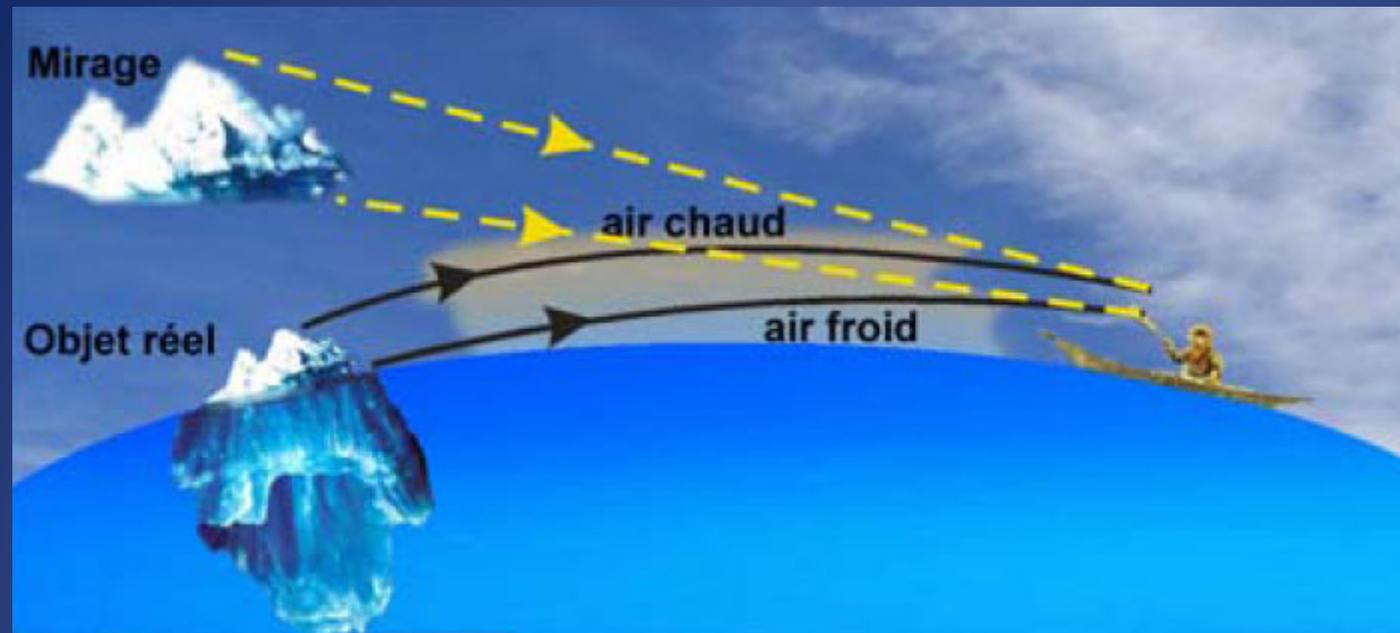




Reflet d'un bateau « flottant » au-dessus du vrai



Mirage : observation d'une image directe et de deux images inversées

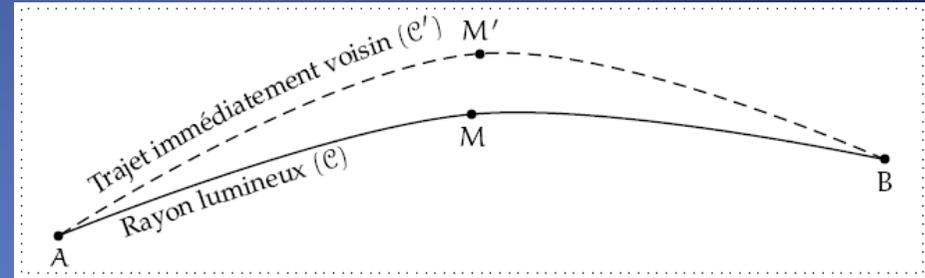


On peut généraliser les lois de Snell-Descartes dans le cas de la *propagation courbe des rayons lumineux* dans un *milieu hétérogène* en recherchant la *condition d'extremum* de l'intégrale curviligne précédente.

Considérons pour cela deux chemins AB voisins, représentés par les courbes (C) et (C') de la figure ci-contre.

On passe de (C) à (C') par le déplacement infinitésimal :

$$\overline{\delta M} = \overline{MM'}$$



Ce déplacement s'accompagne d'une variation du chemin optique δL qui, compte tenu du principe de Fermat, est nulle au voisinage d'un rayon lumineux effectif.

On aura donc : $0 = \int_{M \in C} \delta(\overline{n\vec{u}_t} \cdot d\vec{r})$ avec : $\delta(\overline{n\vec{u}_t} \cdot d\vec{r}) = \delta n(\overline{\vec{u}_t} \cdot d\vec{r}) + \overline{n\vec{u}_t} \cdot \delta(d\vec{r})$

puisque $\delta\vec{u}_t$ est \perp à \vec{u}_t et donc aussi \perp à $d\vec{r} = \vec{u}_t ds$

Comme : $\delta(d\vec{r}) = d(\overline{OM'}) - d(\overline{OM}) = d(\overline{MM'}) = d(\delta\vec{r})$

on peut donc intégrer par parties la seconde partie de l'intégrale : $\int_{M \in C} \overline{n\vec{u}_t} \cdot d(\delta\vec{r}) = \left[\overline{n\vec{u}_t} \cdot \delta\vec{r} \right]_A^B - \int_{M \in C} \delta\vec{r} \cdot d(\overline{n\vec{u}_t})$

Dans cette intégration par parties, le terme tout intégré est nul puisque : $\delta\vec{r}(A) = \delta\vec{r}(B) = 0$

Remarquant alors que : $\overline{\vec{u}_t} \cdot d\vec{r} = \overline{\vec{u}_t} \cdot \vec{u}_t ds = ds$

on peut réécrire le principe de Fermat sous la forme :

$$\int_{M \in C} \left\{ \delta n - \delta \vec{r} \frac{d(n\vec{u}_t)}{ds} \right\} ds = 0$$

Cette intégrale devant être nulle sur toute partie du rayon lumineux effectif, l'intégrant ne peut être que nul en tout point de ce rayon, et l'équation des rayons lumineux prend la forme

$$\delta n = \delta \vec{r} \frac{d(n\vec{u}_t)}{ds}$$

pour tout déplacement arbitraire $\delta \vec{r}$

Comme dans ce cas on peut écrire : $\delta n = \overrightarrow{\text{grad}} n \cdot \delta \vec{r}$

on obtient *l'équation différentielle des rayons lumineux* :

$$\frac{d(n\vec{u}_t)}{ds} = \overrightarrow{\text{grad}} n$$

Que l'on peut encore mettre sous la forme :

$$\frac{d}{ds} \left(n \frac{d\vec{r}}{ds} \right) = \overrightarrow{\text{grad}} n$$

Comme cas particulier, si $n=c^{\text{ste}}$, on a bien :

$$\frac{d^2 \vec{r}}{ds^2} = 0$$

qui a pour solutions des rayons rectilignes :

$$\vec{r} = \vec{a}.s + \vec{b}$$

Remarque : analogie entre l'optique et la mécanique

En mécanique, la loi fondamentale de la dynamique s'écrit :

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}$$

et peut se transformer en : $\frac{d(p\vec{u})}{ds} \frac{ds}{dt} = \vec{F}$ ou encore : $\frac{d(p\vec{u})}{ds} = \frac{\vec{F}}{\|\vec{v}\|}$

On peut écrire que *la lumière se propage selon une trajectoire identique à celle que suivrait une particule matérielle dans les conditions particulières suivantes* (en physique des particules, on utilise la valeur c comme unité de vitesse) :

- ✓ pour une masse unité $m = 1$;
- ✓ pour une vitesse unité $\|\vec{v}\| = \|\vec{u}\| = 1$.

et *soumise à une force F qui dérive d'un potentiel qui n'est fonction que de l'indice de réfraction* :

$$\vec{F} = -\overrightarrow{\text{grad}} \left(-\frac{n^2}{2} \right)$$