La lumière dans tous ses états…

Courte histoire commentée de la lumière

1. Aux temps anciens

Charles Hirlimann

Directeur de recherche émérite CNRS à l'IPCMS

Membre de l'académie d'Alsace

La Physique pour Tous

la lumière avant la science

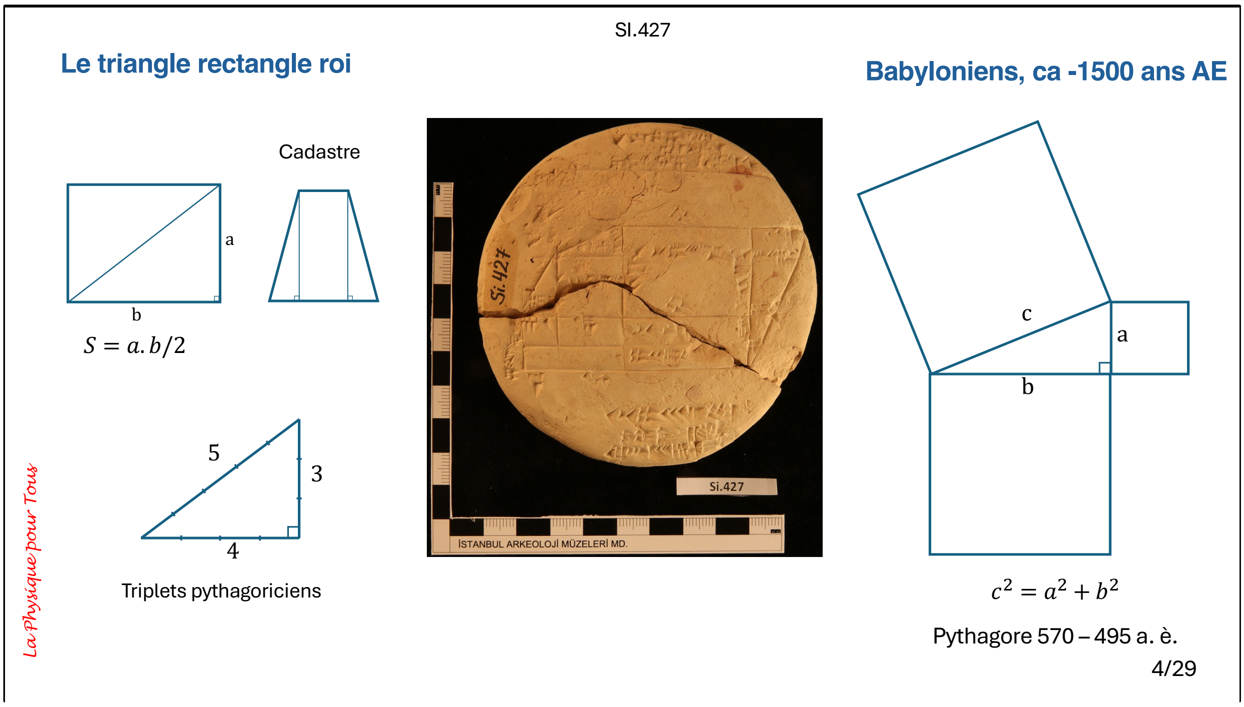
Il y a très, très longtemps

Homo erectus autour d'un feu
1 500 000 ans

Lampes à graisse, Lascaux
23 000 ans

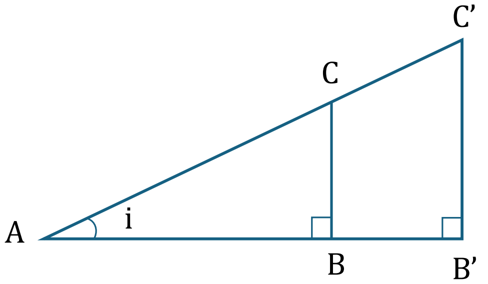
Panneau des chevaux, grotte Chauvet
36 000 ans

Nos ancêtres hominidés ont commencé le travail de la pierre il y a environ 7 Ma et à contrôler le feu il y 3 Ma. On sait, grâce à l'abri sous roche à Menez-Dregan en Bretagne, que le feu était complètement domestiqué il y a environ 400 000 ans. Le contrôle du feu permet la cuisson des aliments, améliorant la fourniture d'énergie au cerveau qui en consomme 20% quand il n'est que 2% de la masse du corps ; il permet de se protéger des grands fauves ; surtout il permet de lutter contre la nuit et d'augmenter le temps d'interactions sociales probablement à l'origine de ca que nous sommes devenus : un animal apprenant.
Beaucoup plus près de nous on trouve l'art rupestre qui dépend entièrement de l'éclairage que l'homme était capable de produire pour s'éclairer dans des grottes profondes sans aucune lumière naturelle. On a donc retrouvé dans les grottes ornées des moyens d'éclairage au moyen de lampe à graisse. On a aussi observé sur les parois des traces charbonneuses interprétées comme due au « mouchage » de torches.
Certaines représentations multiples d'animaux comme, par exemple le panneau des chevaux de la grotte Chauvet, peuvent s'interpréter comme la volonté d'impressionner des visiteurs par l'effet de mouvement que provoque un éclairage fluctuant par des torches.



Les grandes civilisations ont pour la plupart évoluées dans de grandes vallées fluviales, Tigre et Euphrate, Nil, Fleuve Jaune, Indus, soumises à d’importantes crues récurrentes. Une activité cadastrale était nécessaire après chaque crue qui a très rapidement entraîné le développement de connaissance géométriques. La tablette SI. 427, âgée d’environ 3500 ans, est une tablette cadastrale montrant la décomposition d’un terrain en rectangle et en triangles rectangles.
L’importance du triangle rectangle est apparue très tôt car il permet la décomposition de tous les polyèdres et sa surface est facile à calculer car elle vaut la moitié du produit des côtés de l’angle droit. Les triplets pythagoriciens ont des côtés qui se mesurent en nombres entiers et le premier d’entre eux est le triplet 3, 4, 5 -> $3^2 + 4^2 = 5^2$. Une corde à 13 nœuds permet de tracer un angle droit par usage du premier triplet.

Relations angles-distances



Théorème de Thalès

$$\frac{BC}{AC} = \frac{B'C'}{AC'} = Sin(i)$$

$$\frac{AB}{AC} = \frac{AB'}{AC'} = Cos(i)$$

Le côté opposé d'un angle d'un triangle rectangle divisé par l'hypoténuse est un nombre qui caractérise cet angle

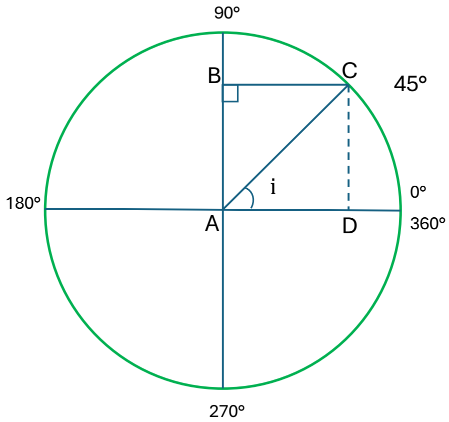
Prémices de la trigonométrie

Calcul analogique à l'astrolabe
Première table de trigonométrie
Hipparchus, II^{e} siècle AE

La Physique pour Tous

Exercice : construction d'une table

$$Sin\ (i) = \frac{AB}{AC} \qquad Cos\ (i) = \frac{BC}{AC}$$



$i = 0°$ $\quad Sin\ (0°) = AB = 0 \quad Cos\ (0°) = BC = 1$

$i = 90°$ $\quad Sin\ (90°) = AC = 1 \quad Cos\ (90°) = BC = 0$

$i = 45°$ $\quad Sin\ (45°) = \frac{1}{\sqrt{2}} \quad Cos\ (45°) = \frac{1}{\sqrt{2}}$

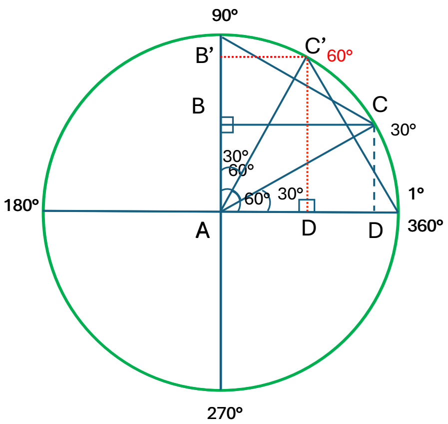
$i = 45° \Rightarrow ABCD\ est\ un\ carré$

$$i = 45° \Rightarrow AB^2 + BC^2 = AC^2 \Rightarrow 2AB^2 = AC^2 \Rightarrow \frac{AB^2}{AC^2} = \frac{1}{2} \Rightarrow \frac{AB}{AC} = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

La Physique pour Tous

Cercle trigonométrique -> AC =1

Exercice : construction d'une table



Cercle trigonométrique -> AC =1

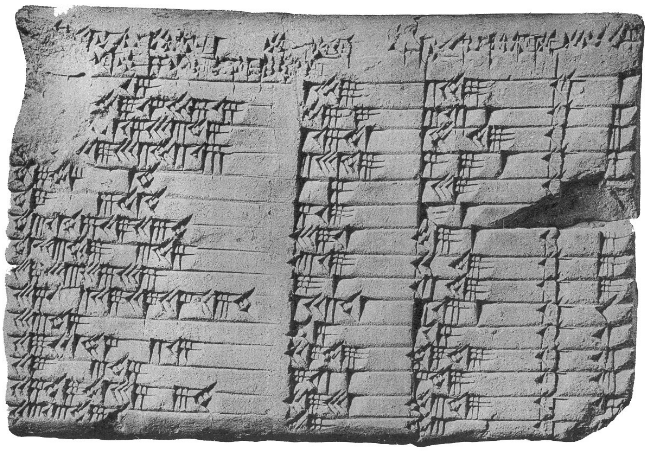
$i = 30°$ $\quad Sin\,(30°) = \frac{AB}{AC} = \frac{1}{2} \qquad Cos\,(30°) = \frac{\sqrt{3}}{2}$

$i = 30° \Rightarrow ABC\ est\ la\ moitié\ d'un\ triangle\ isocèle \Rightarrow AB = \frac{1}{2}AC$

$i = 60°$ $\quad Sin\,(60°) = \frac{DC'}{AC'} = \frac{\sqrt{3}}{2} \qquad Cos\,(60°) = \frac{1}{2}$

$i = 60° \Rightarrow AC'^2 = \frac{AC'^2}{4} + DC'^2 \Rightarrow DC' = AC'\,\frac{\sqrt{3}}{2}$

Table trigonométrique : -1800 AE



i	Sin	Cos
0°	0	1
30°	1/2	$\frac{\sqrt{3}}{2}$
45°	$\frac{1}{\sqrt{2}}$	$\frac{1}{\sqrt{2}}$
60°	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	1/2
90°	1	0
180°	0	- 1

La Physique pour Tous

8/29

La tablette mésopotamienne Plimpton 322 (- 1800 AE) présente dans ses 2^{e} et 3^{e} colonnes une liste d'entiers en notation de position sexagésimale représentant la diagonale et le petit côté d'un rectangle. Ces doublets correspondent à des triplets pythagoriciens. On peut aussi les interpréter comme une table de sinus.

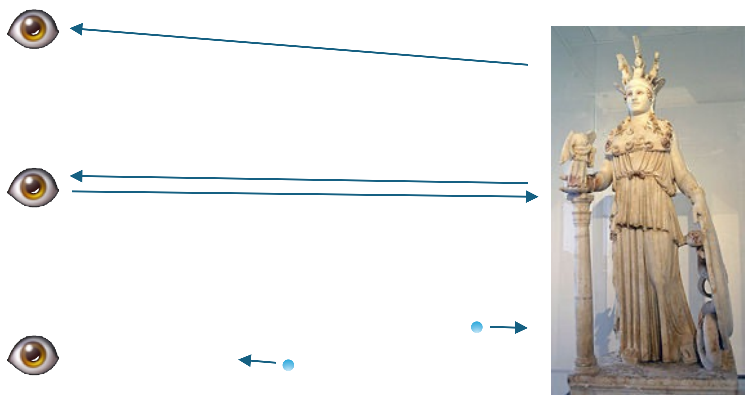
La période grecque, IVe – Ve siècles AE

Empédocle
490-430 AE

Platon
428-347 AE

Aristote
384-322 AE

Démocrite d'Abdère
460-370 AE



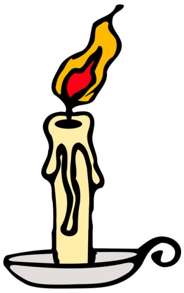
Les Grecs ont compris que la réflexion se produit dans un plan unique

La Physique pour Tous

9/29

Empédocle pensait que les yeux captaient des émissions des objets visibles. Platon et son élève Aristote ont fait l'hypothèse de l'extramission, c'est à dire de l'émission par les yeux de rayons visuels qui après réflexion sur les objets y revenaient.
Démocrite d'Abdère invente l'atomisme, avec un univers constitué d'atomes et de vide. Une famille d'atomes qui remplissent l'espace se réfléchissent sur les objets et pénètrent les yeux.
Les Grecs ont reconnu que la réflexion se produit dans un plan unique.

La période grecque



Chandelle

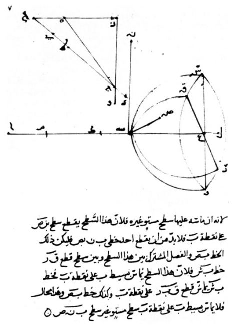
Lampe à huile

La Physique pour Tous

La chandelle est attestée depuis la Mésopotamie, elle est restée très longtemps un objet cher et a été de fait moins employée que les lampes à huile. Constituée d'un cylindre de suif contenant sur son axe de symétrie une mèche de fil tressée (coton, lin), elle fumait beaucoup, éclairait mal et nécessitait sans cesse de moucher la partie brûlée de la mèche. Le suif est obtenu par ébouillantage de graisse animale, surtout de mouton et de bœuf. Une lampe à huile élaborée de la période grecque classique.

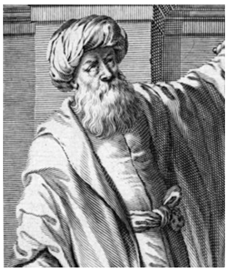
l'entrée en science de la lumière

l'optique, X^{e} siècle



Ibn Sahl, Bagdad (940-1000)
984, traité sur les miroirs ardents et les lentilles

Ibn al-Haytham (Alhazen), Le Caire (965-1040)
ca 1011 ou 1021, Traité d'optique, méthode scientifique



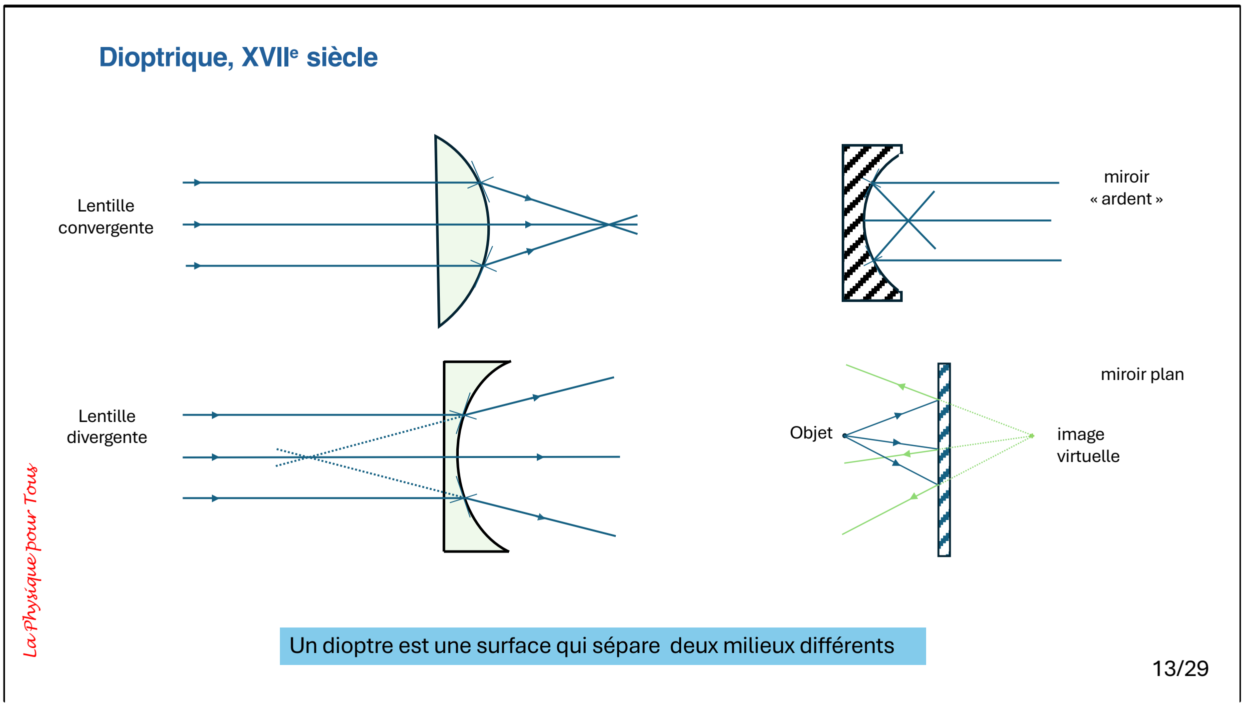
L'optique est la science qui traite de la lumière

- La lumière est indépendante de l'observateur
- Elle se propage en ligne droite, rayon lumineux
- La réflexion se produit dans un plan unique
- La réfraction se produit dans ce même plan

La Physique pour Tous

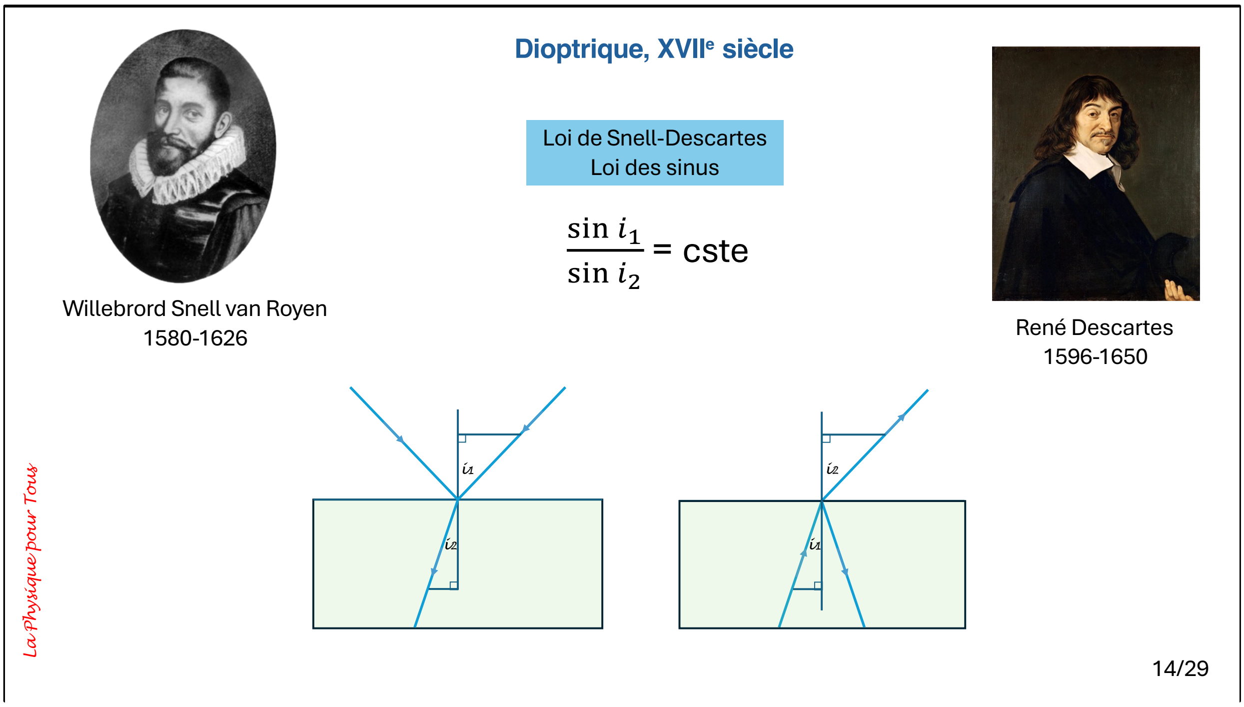
12/29

Ibn al-Haytham (965-1040), appellé Alhazen en occident a créé la science optique en pratiquant l'expérience pour construire ses théories. Alhazen est surtout connu pour son ouvrage majeur "Kitab al-Manazir" (Livre de l'Optique), également traduit en latin sous le titre de "Opticae Thesaurus". Dans ce livre, il a exploré de manière approfondie les principes de la vision, de la lumière et de l'optique géométrique. Alhazen a notamment étudié la réflexion et la réfraction de la lumière, et il a été le premier à comprendre correctement la formation des images par des lentilles et des miroirs.
Ibn Sahl (940-1000) a trouvé les lois de la réfraction.



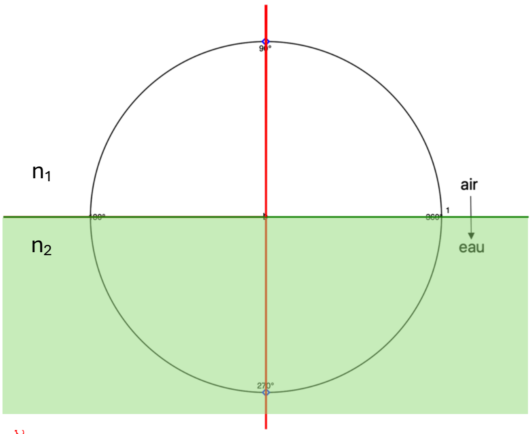
La dioptrique est la science du tracé des rayons lumineux à leur passage d'une surface séparant deux milieux de propriétés différentes. Le cas des miroirs est le plus simple : un rayon lumineux qui tombe sur une surface métallique polie se réfléchi dans le même plan que son plan d'incidence et avec un angle de réflexion égal à l'angle d'incidence.

- Suivant cette loi, on voit sur la figure en bas à droite comment un miroir plan forme une image virtuelle d'un point d'un objet. Les rayons lumineux pénétrant l'œil de l'observateur situé à gauche permettent d'observer cette image virtuelle. La symétrie par réflexion inverse la droite et la gauche.
- Les rayons lumineux en provenance de l'infini sont parallèles. Lorsqu'ils tombent sur un miroir concave ils convergent en un point unique appelé foyer. L'étymologie du mot indique bien l'observation ancienne de la concentration des rayons du Soleil par les miroirs « ardents ».
- Le passage de la lumière à travers le dioptre séparant deux milieux transparents différents dévie les rayons. On observe ces déviations sur la gauche de la figure dans les cas de lentilles de verre convexe et concave. Une lentille convexe focalise la lumière tandis qu'une lentille concave la disperse.

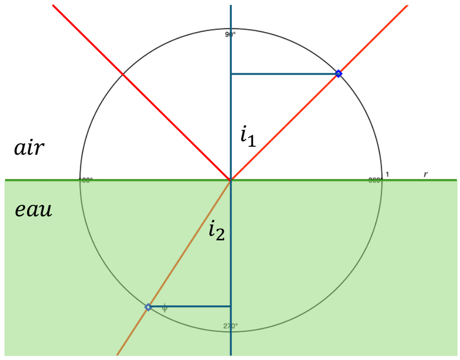


Snell, vers 1625, et Descartes, en 1637, établissent la loi de réfraction de la lumière au passage d'un dioptre. Cette loi stipule que le rapport des sinus des angles incident et réfracté est constant. Le sinus d'un angle d'un triangle rectangle est égal au rapport du côté opposé de l'angle par l'hypoténuse.

La loi des sinus



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



La Physique pour Tc

Exercice : on mesure $i_1 = 45°$, $i_2 = 33°$ que vaut l'indice de l'eau rapporté à l'indice de l'air

$$\sin i_1 = \frac{1}{\sqrt{2}},\ \sin i_2 = 0{,}54 \quad \Rightarrow \quad n_2/n_1 = 1{,}3$$

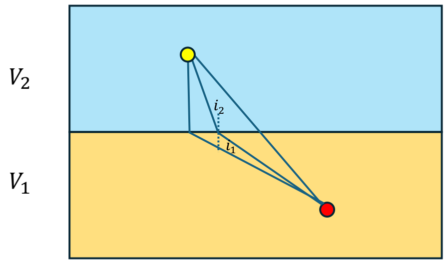
15/29

Étude de la loi des sinus. Si un rayon lumineux tombe sur le plan qui sépare deux milieux d'indice n_1 et n_2 (dioptre) sous l'angle d'incidence i_1 (angle qu'il fait avec la normale au dioptre) alors il est réfracté dans le milieu 2, sous un angle i_2 telle que $n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$. Dans l'exemple choisi sur cette planche, l'indice de l'air est $n_1 = 1$ et l'indice de l'eau $n_2 = n = 1{,}33$. Les calculs se faisaient autrefois en utilisant une table trigonométrique donnant le sinus d'un angle de degré en degré et en faisant une interpolation linéaire entre deux angles successifs. Aujourd'hui il y a sur Terre 5 milliards d'êtres humains qui ne savent pas qu'ils ont dans la poche une table trigonométrique : la calculette de leur smartphone ! Les logiciels de calcul des sommes de fonctions polynomiales qui donnent des valeurs aussi précises que nécessaire des fonctions trigonométriques.

Dioptrique

$V_1 > V_2$

A
B



Le chemin optique de la lumière entre deux points est tel que la durée du parcours est localement minimale. 1657.

Certains chemins comportant des miroirs peuvent être maximums.

Principe de Fermat

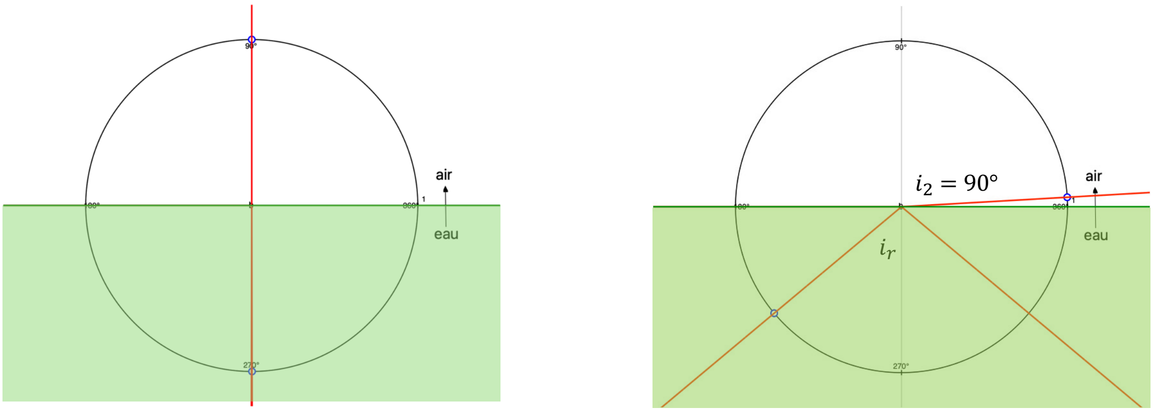
Pierre de Fermat
~1605-1665

La Physique pour Tous

16/29

Pour comprendre la réfraction Pierre de Fermat : sur de courte trajectoire la lumière se propage d’un point à un autre sur des trajectoires telle que la durée de propagation soit minimum. Ce principe est souvent illustré par le maître nageur, au bord de la mer, qui veut sauver une personne de la noyade. Comme il court plus vite sur le sable qu’il ne nage, un trajet en ligne droite n’est pas optimum. Il a intérêt à courir plus longtemps sur la plage avant de se jeter à l’eau et on peut montrer que s’il respecte la loi des sinus alors la durée de son trajet est minimale.

La réflexion totale



Eau, $n = 1,3$

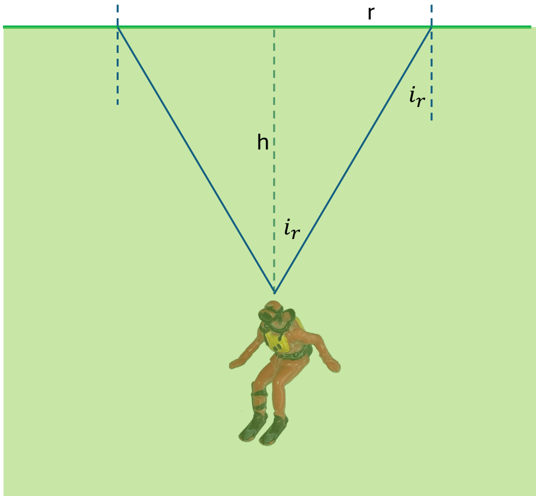
$$n \,Sin\, i_r = Sin\, i_2 = 1 \Rightarrow i_r = Arcsin\left(\frac{1}{1,3}\right) = 50°$$

La Physique pour Tous

17/29

On s'intéresse ici à l'angle de réflexion totale sur le dioptre air-eau qui est l'angle de réfraction maximum atteint par le rayon transmis lorsque l'angle incident atteint 90°, l'incidence rasante. Si on considère maintenant les rayons se propageant de l'eau à l'air, lorsque l'angle d'incidence atteint l'angle i_r le rayon réfracté dans l'air atteint l'incidence rasante. Pour tout angle supérieur à i_r il ne peut pas y avoir de rayon réfracté dans l'air, toute la lumière est réfléchie sur le dioptre et on parle de réflexion totale.

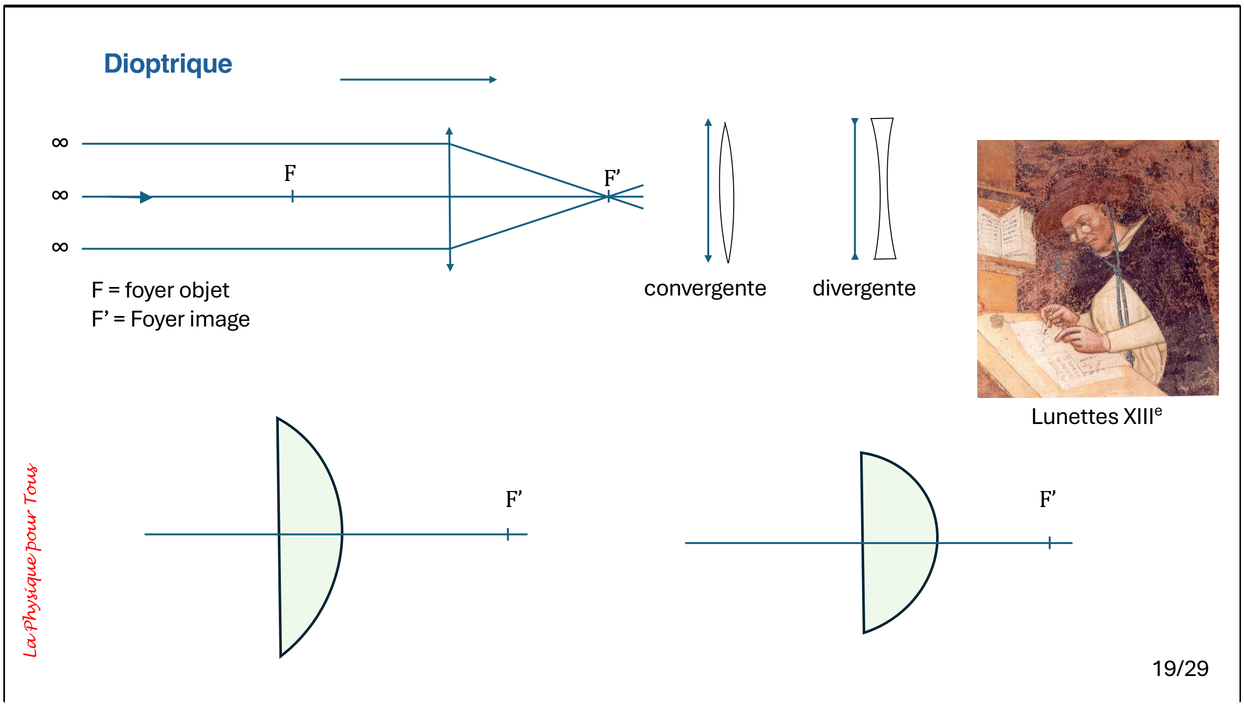
La réflexion totale



Exercice : qu’elle est le diamètre de transparence pour un plongeur à 5 m de profondeur.

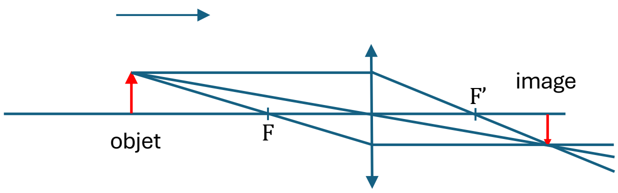
Réponse : tg 50° = r/h => D = 2r = 7,66 m

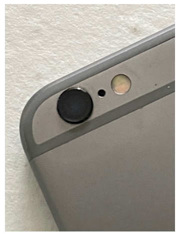
À gauche lorsqu’un plongeur sous-marin regarde vers la surface, il ne peut recevoir que des rayons dont l’angle de réfraction est inférieur à l’angle de réflexion totale dans l’eau i_r. Ces rayons sont tous compris dans un cône d’angle au sommet égal à 2 i_r. À droite : la vue qu’a ce plongeur du dioptre eau-air qui le surplombe.



Les lentilles minces sont symboliquement représentées par un segment fléché vers l'extérieur pour une lentille convergente, vers l'intérieur pour une lentille divergente. Par convention les rayons lumineux se propagent de la gauche vers la droite. Sur la gauche on trouve le foyer objet qui se trouve du côté d'où arrive la lumière renvoyée par un objet, symétrique par rapport à la lentille on trouve le foyer image défini par le point où convergent les rayons lumineux provenant de l'infini. Le foyer d'une lentille plan-convexe est d'autant plus court que le rayon de courbure du dioptre convexe est petit. Les dispositifs optiques les plus simples sont la loupe et les lunettes qui ne comportent qu'une seule lentille. Ces instruments ont été indispensables aux moines copistes vieillissants.

Dioptrique : tracé des rayons, cas d’un objectif





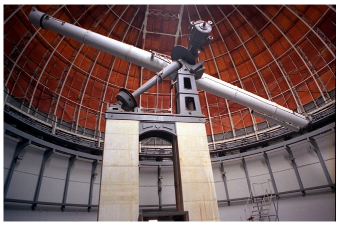
- Les rayons parallèles à l'axe convergent au foyer image.
- Les rayons passant par le foyer objet émergent parallèlement à l'axe.
- Un rayon passant par le centre optique n'est pas dévié.

La Physique pour Tous

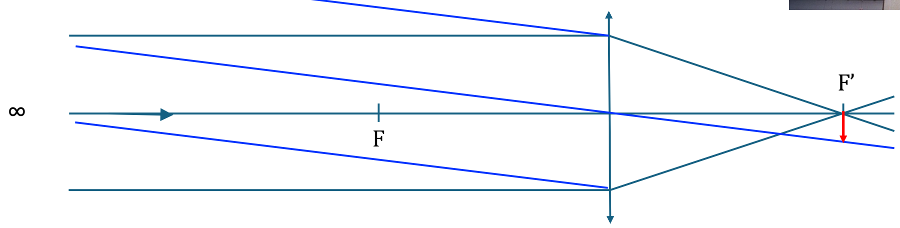
20/29

Règles de construction des images avec des lentilles simples. 1) Les rayons lumineux passant par le centre de la lentille (centre optique) ne sont pa déviés, 2) un rayon parallèle à l’axe optique de la lentille est réfracté de manière à passer par le foyer image, 3) les rayons passant par le foyer objet émergent de la lentille parallèlement à l’axe optique. Ces règles sont universelles, dans la limite des lentilles minces. Pour les lentilles divergentes, les foyers objets et image sont inversés par rapport au sens de propagation de la lumière mais les règles restent les mêmes.

Dioptrique : tracé des rayons, cas d'un objectif, objet à l'infini

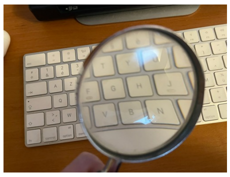


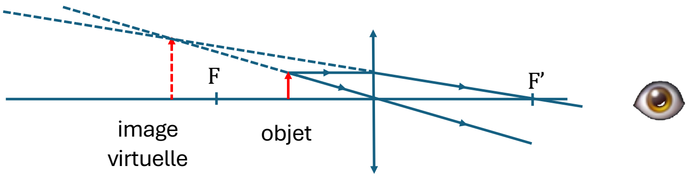
CC BY-SA 3.0



L'objet est caractérisé par l'angle sous lequel on le voit
L'image est au foyer image, seul le rayon passant par le centre est nécessaire

Dioptrique : tracé des rayons, cas d'un oculaire



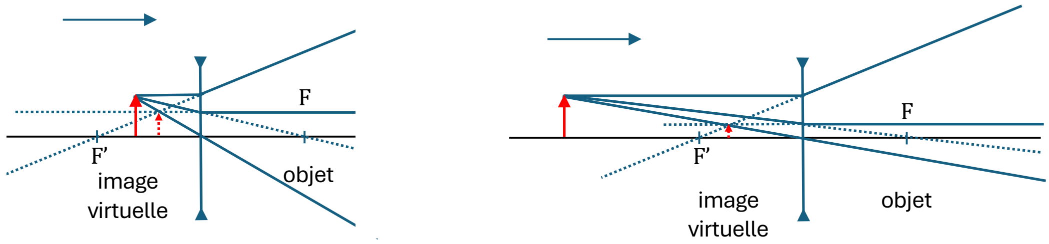


loupe
lunettes
microscope

Loupe

On considère maintenant l'objet placé entre le foyer objet et la lentille.

Exercice : lentille divergente

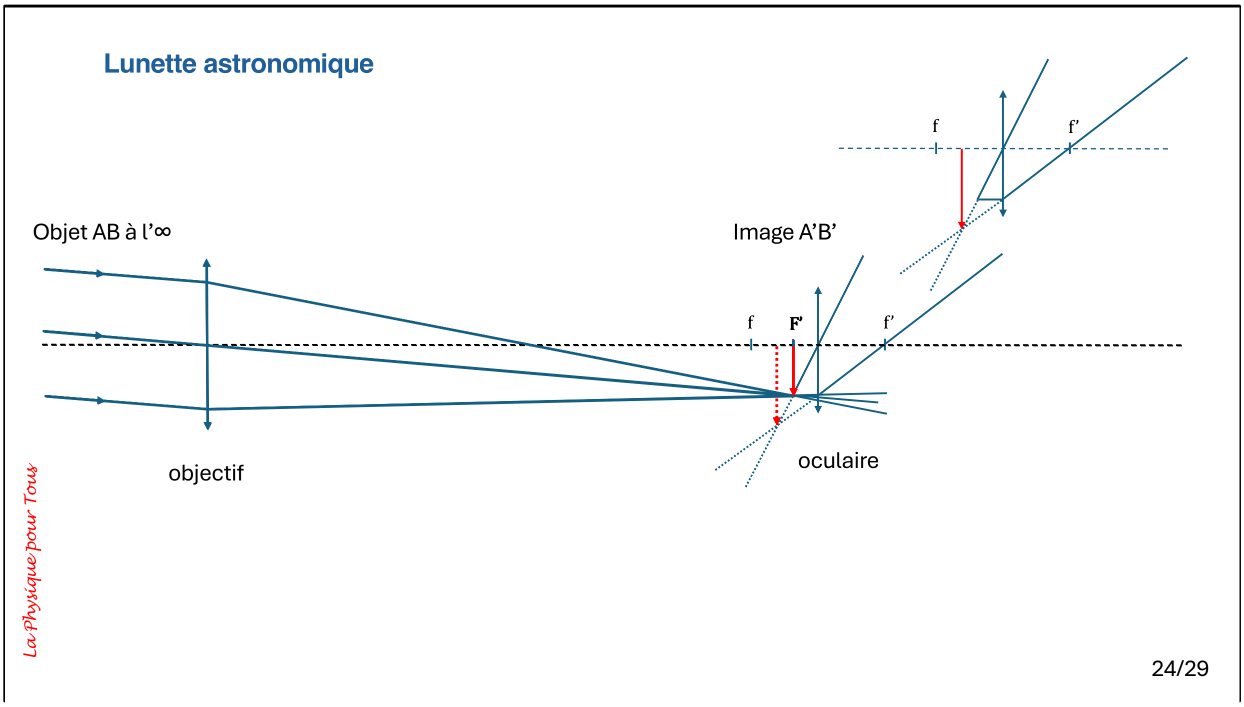


foyer objet et foyer image sont inversés
règles inchangées

La Physique pour Tous

23/29

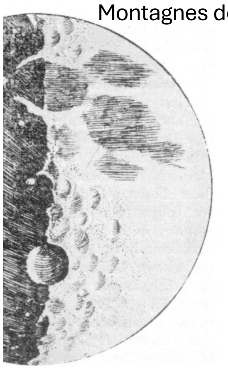
Pour les lentilles divergentes, les foyers objets et image sont inversés par rapport au sens de propagation de la lumière mais les règles de tracé de rayon restent les mêmes. Comme on peut le voir sur la figure, la lentille divergente donne une image virtuelle droite, c'est pourquoi elle a été souvent utilisée dans les longues-vues ou lunettes terrestres, mais aussi par Galilée.



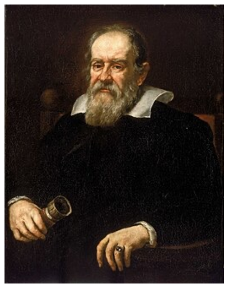
Une lunette astronomique est essentiellement constituée d'une lentille à longue focale. Cette lentille dite « objectif » forme de tout objet à l'infini, représenté par un faisceau de rayons parallèles, une image inversée en son foyer image. Une seconde lentille, nommée « oculaire », car proche de l'œil de l'observateur, est utilisée comme loupe pour observer agrandie l'image de l'objet. Si la lentille oculaire est convexe convergente, l'image observée reste inversée, si l'oculaire est une lentille concave divergente, l'image observée est droite. On parle dans le premier cas de lunette astronomique et de lunette terrestre dans l'autre. Les lunettes de Galilée étaient des lunettes terrestres.
`

De l'infiniment grand…

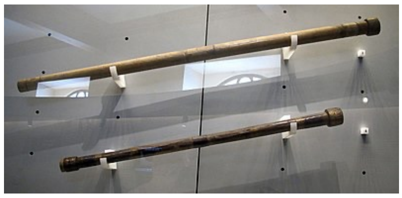
Montagnes de la Lune



Galilée
1564-1642



Satellites de Jupiter

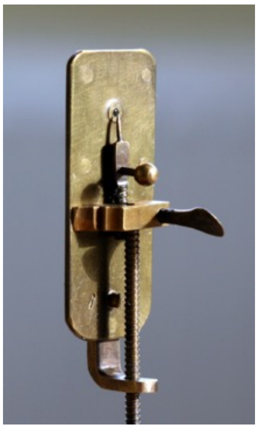


Lunettes de Galilée

25/29

Les progrès réalisés dans la compréhension des règles de la dioptrique, à l'aube du XVIIe siècle, sont telles que Galilée put réaliser des lunettes d'observation d'un grossissement de quelques dizaines qu'il eut l'idée de tourner vers le ciel. Sa découverte des satellites de Jupiter en janvier 1610 conforta la révolution Copernicienne de la place centrale du Soleil dans notre système planétaire.

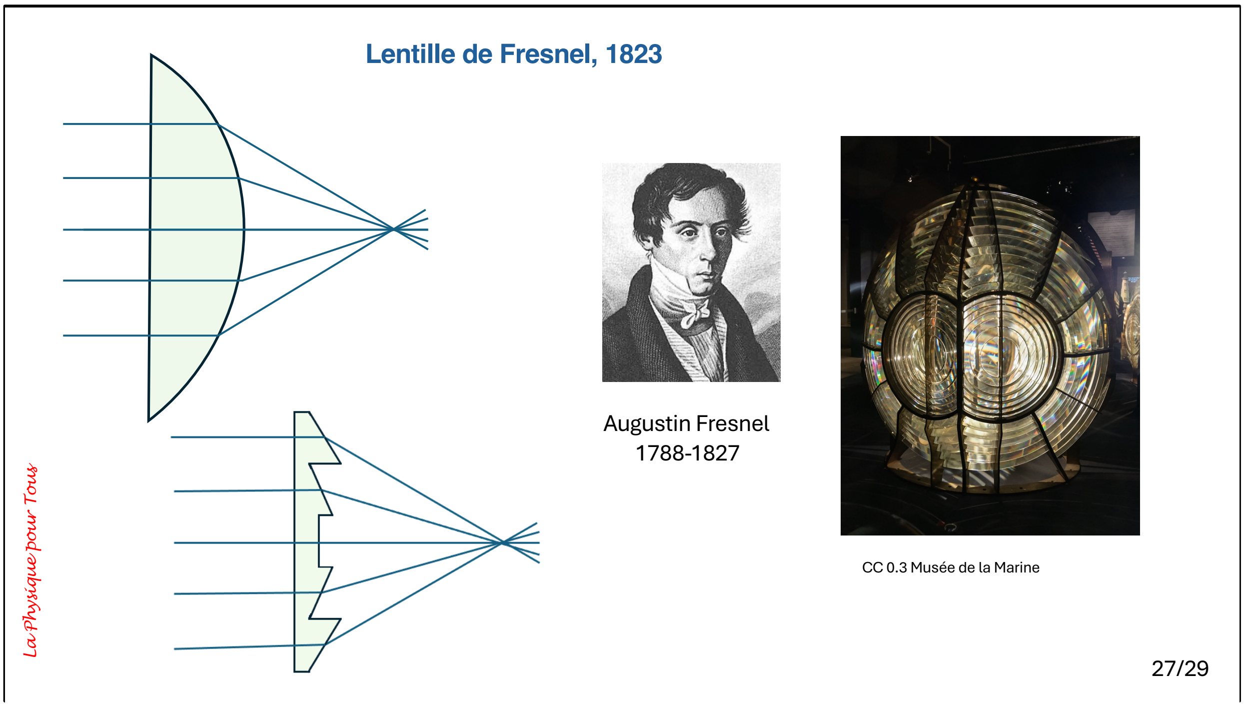
planche d'observation



microscope

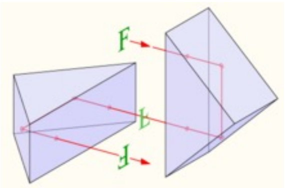
Van Leeuwenhoek
1660-1699

à l'infiniment petit…

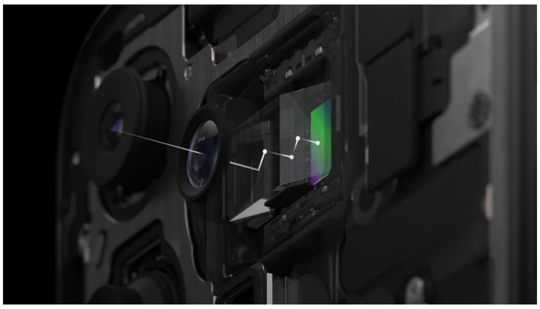


Outre ses découvertes sur la diffraction de la lumière, Augustin Fresnel permit la fabrication de grandes lentilles de collimation pour améliorer l'efficacité des phares. Il utilisa le fait que seul le dioptre verre-air d'une lentille contribue à la déflexion des rayons lumineux et qu'il pouvait donc supprimer le plus gros de l'épaisseur de verre et ne conserver qu'une série concentrique de prismes circulaires pour collimater de larges faisceaux de lumière au prix d'une perte acceptable de qualité optique. La perte de poids considérable ainsi obtenue lui a permis de faire réaliser des lentilles de plus d'un mètre de diamètre. De nos jours, des lentilles de Fresnel bon marché, obtenues par pressage d'une feuille plastique, sont utilisées dans des dispositifs d'éclairage ne nécessitant pas des qualités optiques trop importante.

Redressement d’image par réflexion totale



Prismes de Porro



source : Apple

La Physique pour Tous

Une paire de prismes à 90° permet tout à la fois de retourner une image et d’allonger un trajet optique.

À suivre…

Charles.Hirlimann@ipcms.unistra.fr

La Physique pour Tous

La Physique pour Tous