HISTOIRES DE LUMIÈRES

Les miroirs ardents d’Archimède

Opticae Thesaurus d’Alhazen
vers 1020

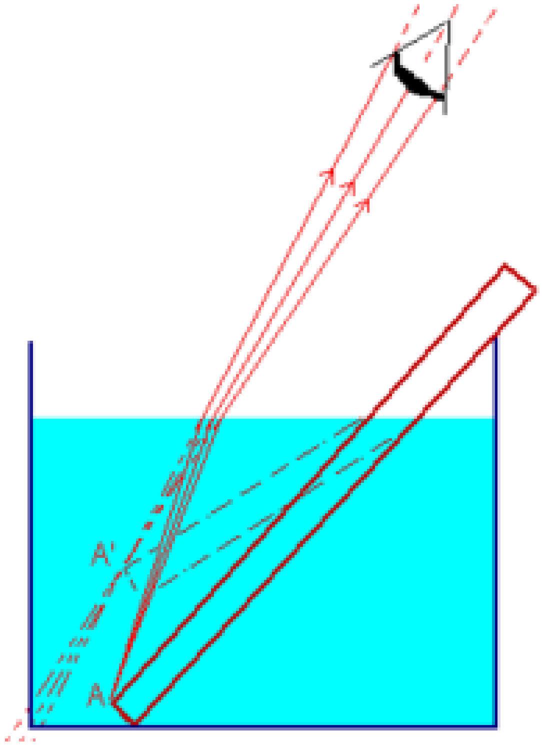
La loi de la réfraction

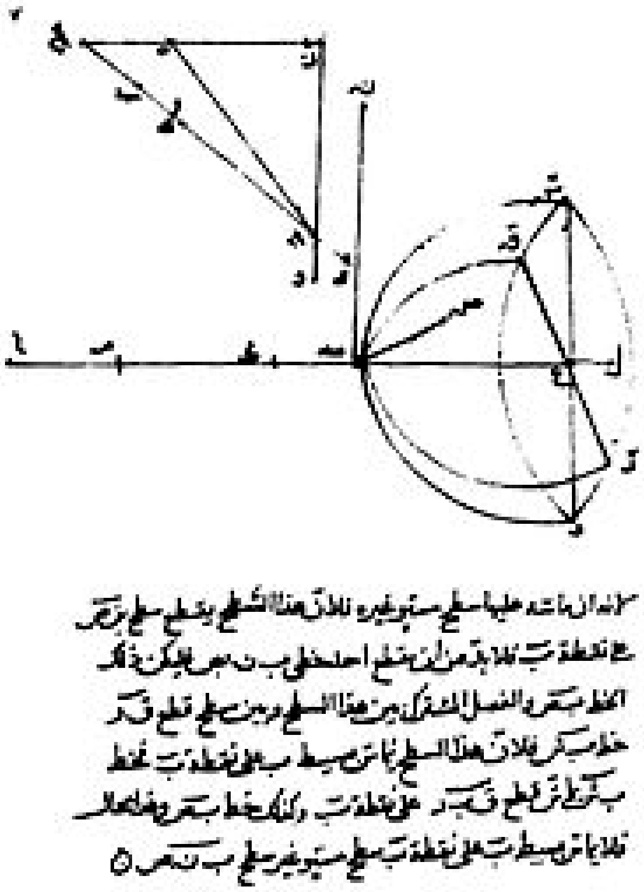
- Abou Ibn Sahl , vers 984
- Snell (1580- 1626)
- Descartes (1637)

sin i = n . sin r

n : indice du milieu dans lequel

la vitesse de la lumière est $\frac{c}{n}$.





A Berlin, je m’étais lié d' amitié avec Maupertuis. Ce savant (courageux, et connu pour son voyage en Laponie) avait eu, en 1740, une idée merveilleuse et simple a la fois :

« Et si toutes les lois du monde obéissaient à un même principe ? »

Si, par exemple, les corps ne tombaient vers la Terre que parce qu'ils cherchaient à en faire le moins possible ?

S'ils ne se déplaçaient jamais que pour minimiser quelque chose, un travail, une énergie, une force ou une action à découvrir ?

Et si la lumière elle-même ne suivait son chemin que parce qu'il était le plus court ?

Maupertuis avait ainsi conçu l’idée d'un principe général, qui régirait les équilibres du monde : **le principe de moindre action** !

Je me souviens de cette soirée magnifique ou nous venions de déguster une belle friture d'ablettes dans une auberge des bords de la Havel.

Nous nous étions échappés du château de Sans-Souci, à Potzdam, et des fastes de la cour du roi Frédéric …

Lomonossov se léchait les doigts avec délice ; il attira notre attention sur ces rayons de soleil crépusculaires qui coloraient l'atmosphère de roses et de pourpres flamboyants. Maupertuis, qui avait apprécié le vin du Rhin généreusement servi, devint tout a coup très lyrique devant cette magie de la lumière. Non sans malices et de l'air très docte qu'il savait si bien prendre pour se moquer de lui-même, il se proposa de nous démontrer la *loi de Snellius* sur la réfraction de la lumière, loi que les Français appellaient *loi de Descartes*.

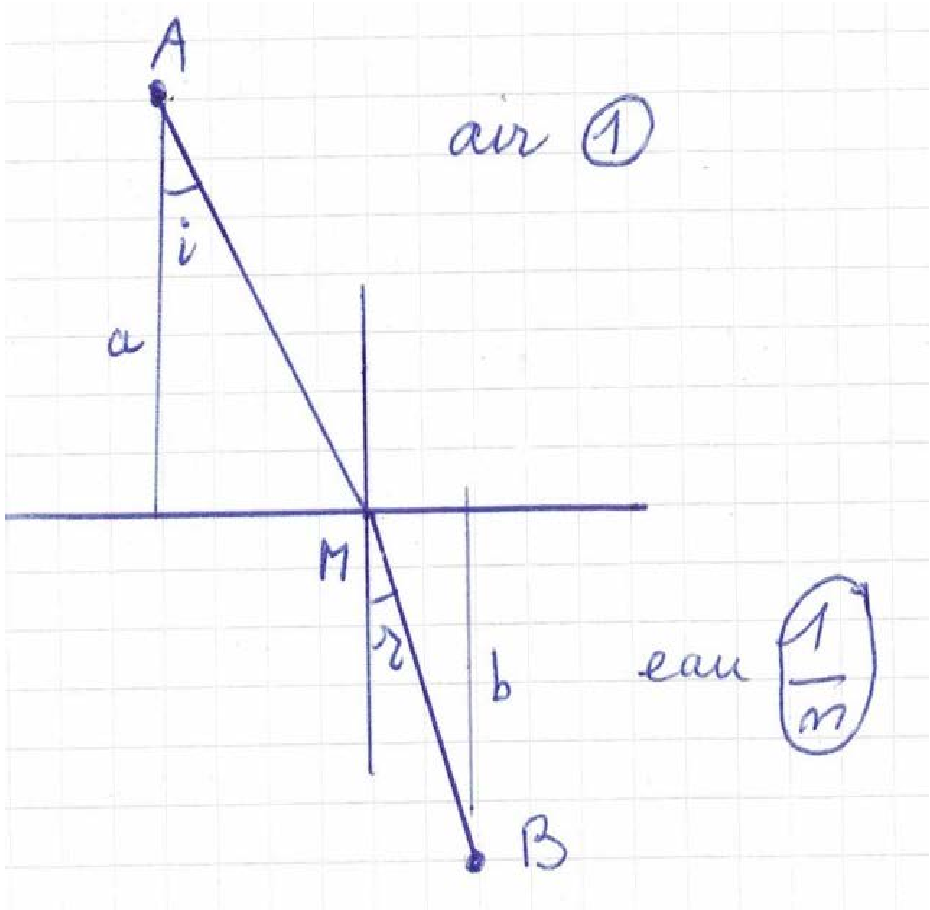
Supposons, nous dit-il que la lumière n'avance pas à la même vitesse dans l'air et dans l' eau, comme si elle peinait plus à se frayer un passage a travers les particules liquides.

Et prenons pour principe que le Dieu créateur lui impose d'aller toujours d'un point à un autre dans le plus court des temps possibles.

S'ensuivit alors une suite de calculs qu'il poursuivit sur la table même et où nous le voyions jongler avec les lignes trigonométriques et leurs différentielles.

Où placer M entre A et B ?

$$T = \frac{a}{\cos i} \cdot \frac{1}{c} + \frac{b}{\cos r} \cdot \frac{n}{c}$$



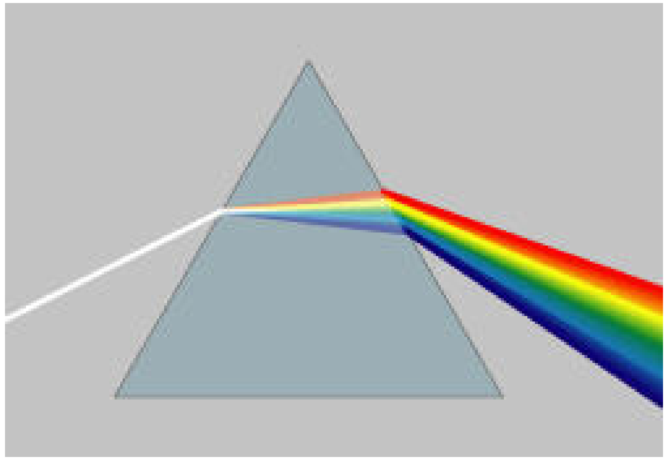
$$a.\tan i + b.\tan r = cte$$

$$\frac{a.\sin i}{\cos^2 i} + \frac{b.n.\sin r}{\cos^2 r} = 0$$

$$\frac{a}{\cos^2 i} + \frac{b}{\cos^2 r} = 0$$

$$\frac{-b}{\cos^2 r} \cdot \frac{\cos^2 i}{a} = 1 = \frac{\sin i}{\text{n}.\sin r}$$

L’indice de réfraction dépend de la longueur d’onde …



$$N = 1{,}234 + 3100/\lambda^2$$

Couleur		longueur d'onde (1 nm = 10^{-9} m)
violet		380 à 450 nm
bleu		450 à 490 nm
vert		490 à 570 nm
jaune		570 à 585 nm
orange		585 à 620 nm
rouge		620 à 670 nm

Isaac Newton (1643-1727), en 1665, dans le manoir familial de Woolsthorpe.

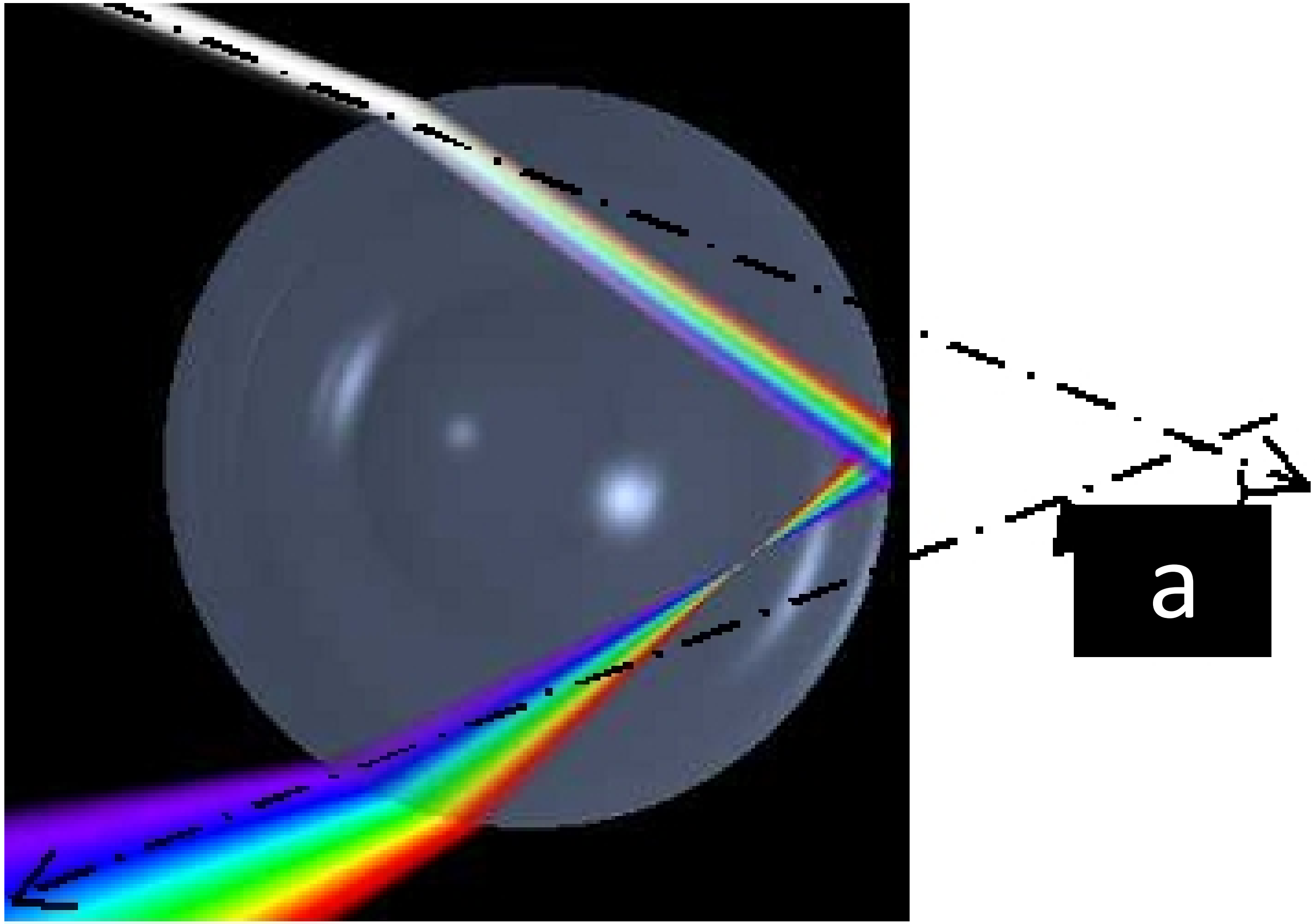
De l’arc en ciel

L'arc-en-ciel est une merveille de la nature si remarquable, et sa cause a été de tout temps si curieusement recherchée par les bons esprits, et si peu connue, que je ne saurais choisir de matière plus propre à faire voir comment, par la méthode dont je me sers, on peut venir à des connaissances que ceux dont nous avons les écrits n'ont point eues.

…

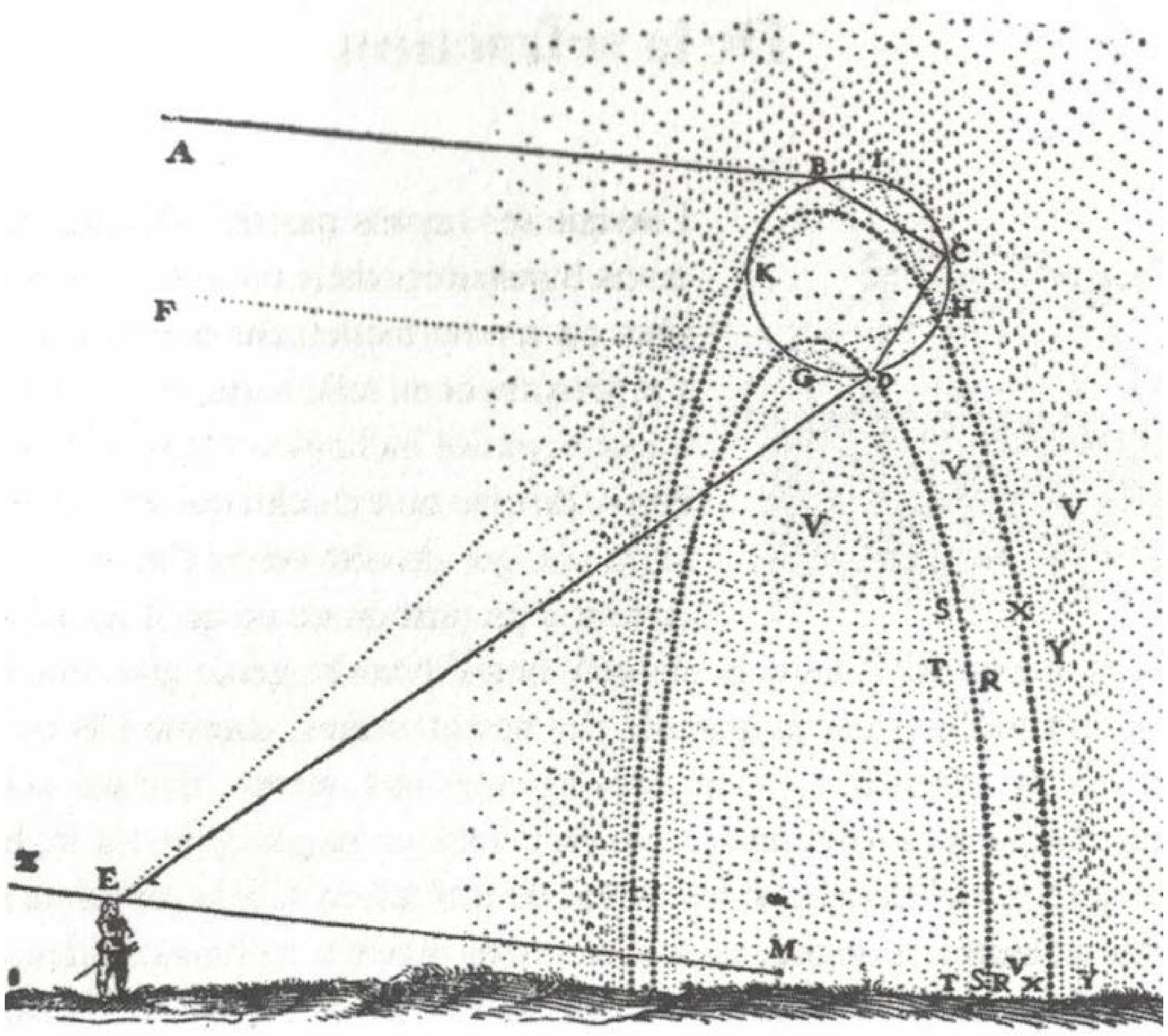
Puis sachant que ces gouttes sont rondes, ainsi qu'il a été prouvé ci-dessus, et voyant que, pour être plus grosses ou plus petites, elles ne font point paraître cet arc d'autre façon, je me suis avisé d'en faire une fort grosse, afin de la pouvoir mieux examiner.

L’arc en ciel

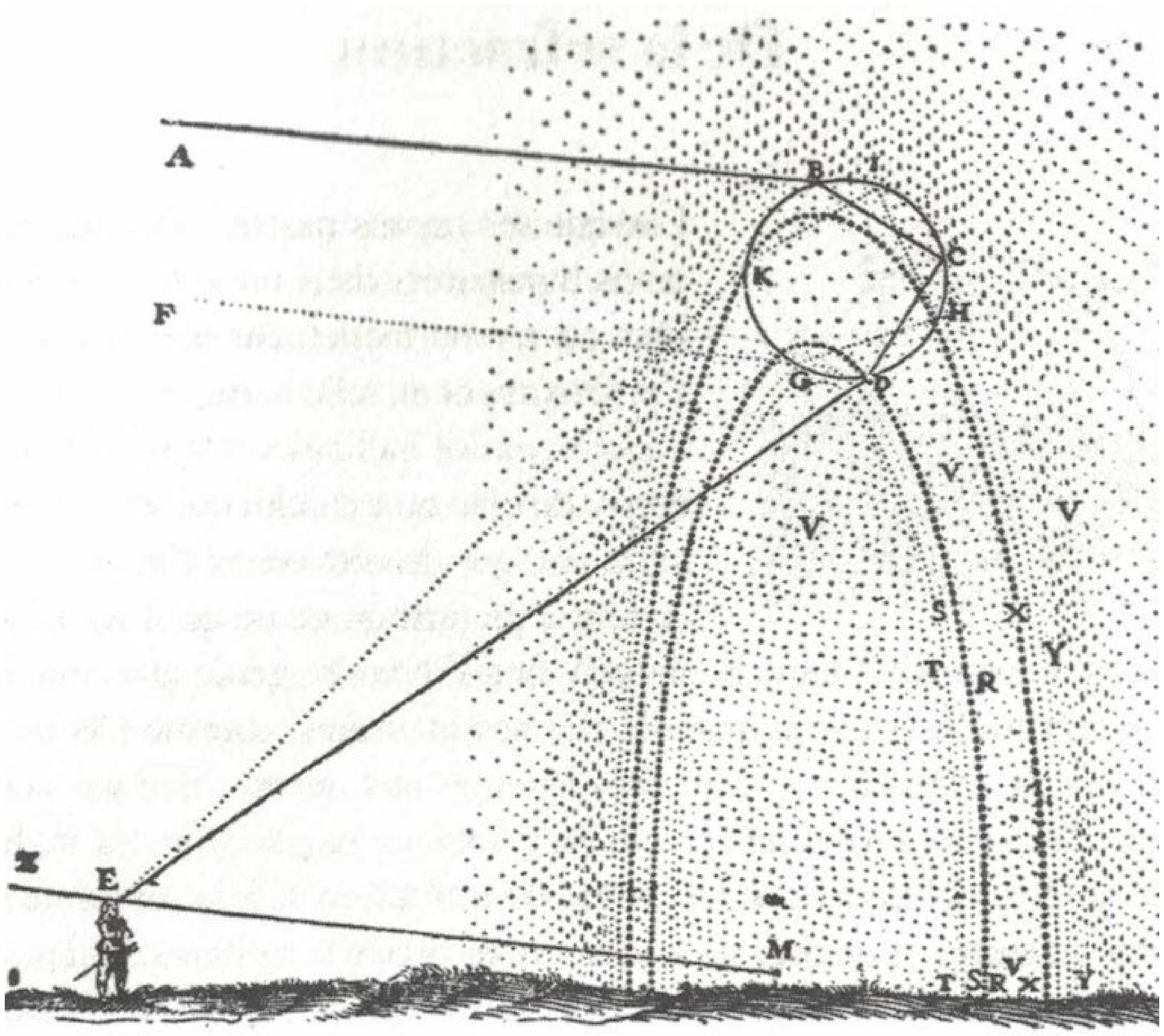


René Descartes dans un des appendices à son *Discours de la Méthode*, *Les météores*,
paru en 1637.

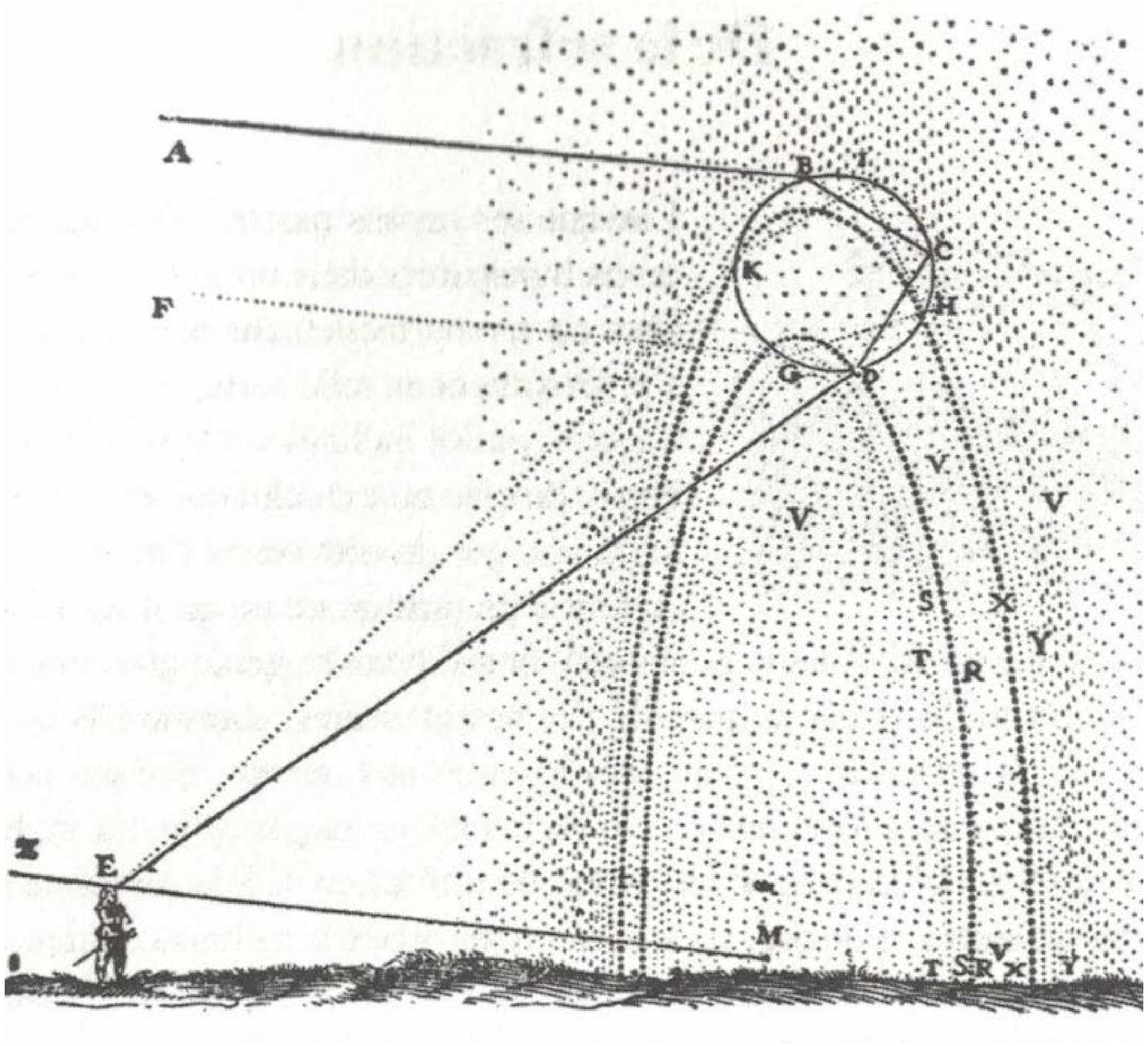
Et ayant rempli d'eau, à cet effet, une grande fiole de verre toute ronde et fort transparente, j'ai trouvé que, le soleil venant, par exemple, de la partie du ciel marquée AFZ, et mon œil étant au point E, lorsque je mettais cette boule en l'endroit BCD, sa partie D me paraissait toute rouge et incomparablement plus éclatante que le reste.



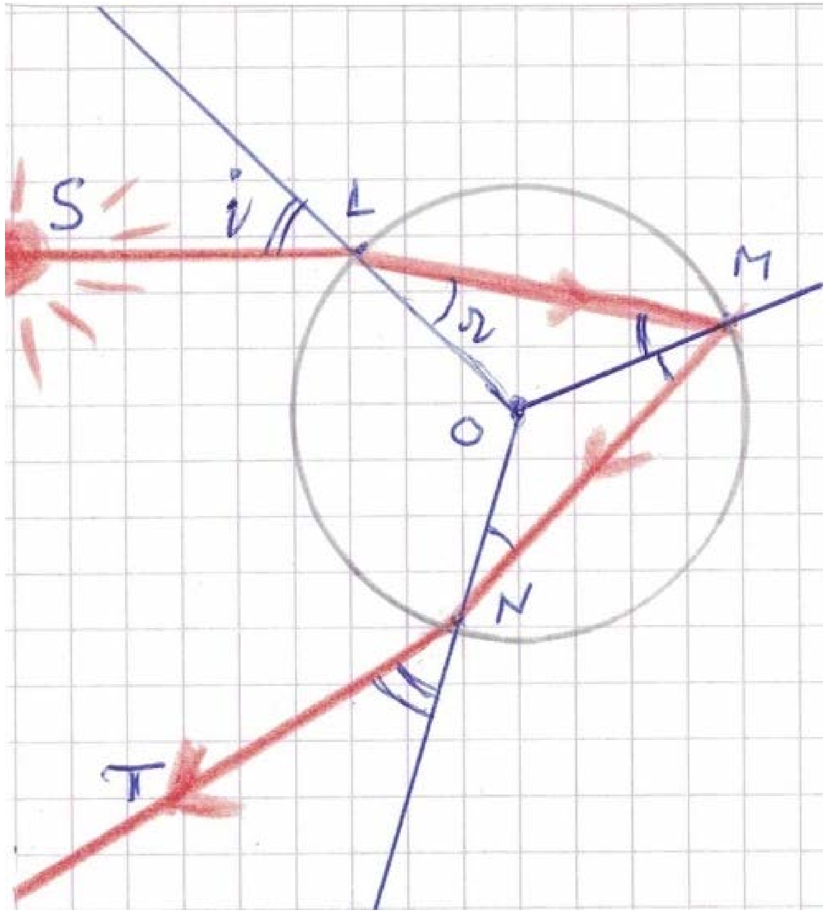
Et que, soit que je l'approchasse, soit que je la reculasse, et que je la misse à droite ou à gauche, ou même la fisse tourner autour de ma tête, pourvu que la ligne DE fit toujours un angle d'environ 42 degrés avec la ligne EM, qu'il faut imaginer tendre du centre de l'œil vers celui du soleil, cette partie D paraissait toujours également rouge.



- D'où j'ai connu manifestement que, tout l'air qui est en M étant rempli de telles boules, ou en leur place de gouttes d'eau, il doit paraître un point fort rouge et fort éclatant en chacune de ces gouttes dont les lignes tirées vers l'œil E font un angle d'environ 42 degrés avec EM, comme je suppose celles qui sont marquées R ; et que ces points étant regardés tous ensemble, sans qu'on remarque autrement le lieu où ils sont que par l'angle sous lequel ils se voient, doivent paraître comme un cercle continu de couleur rouge.



Un peu de calcul…



Avec les angles de vecteurs :

(SL,LM) = r - i

(LM,MN) = 2r - 180

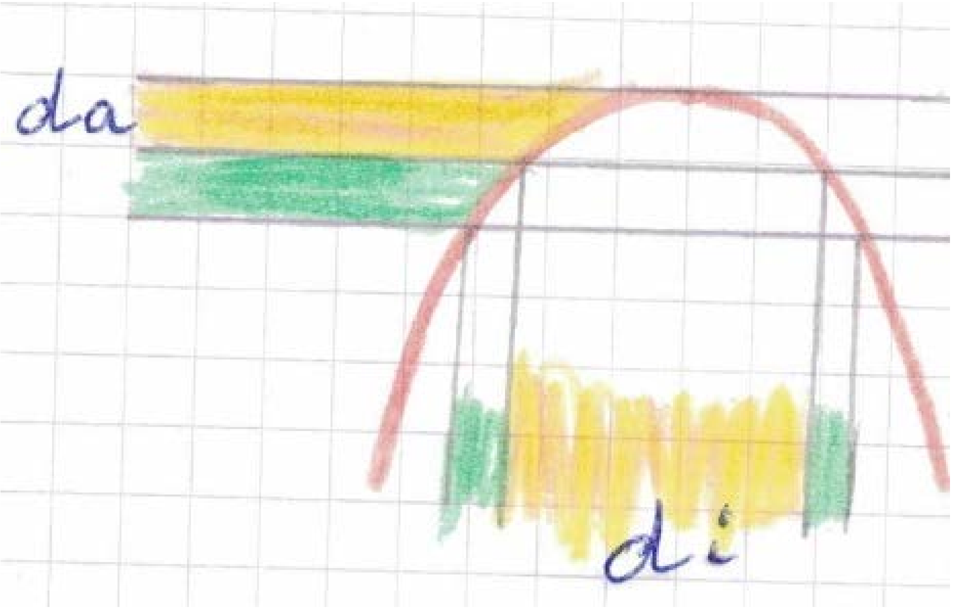
(MN,NT) = r - i

D’où l’angle entre les rayons du soleil

et la vision de l’arc par l’œil :

a = 4.r - 2.i

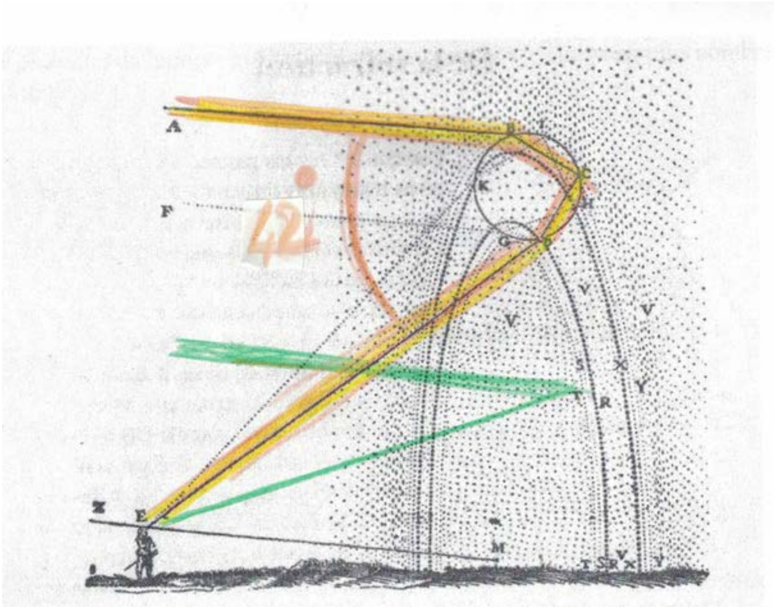
Pourquoi a = 42° ?



Quand les rayons du soleil arrivent sur une goutte d'eau, la perte de luminosité, dans ces réfractions-réflexions, est telle que l'on ne voit pas ce qui reste des rayons de soleil…

… sauf lorsque l'angle d'arrivée de ces rayons sur les gouttes est tel que l'angle sous lequel on les voit est maximum.

Si on trace a en fonction de i, alors autour du maximum de a, on verra beaucoup plus de rayons envoyés par le soleil (i) qu'ailleurs.



calculs

da = 4 dr - 2 di   sin i = n.sin r

cos i di = n.cos r dr

$$\mathrm{dr} = \frac{\cos i}{\mathrm{n.cos\ r}}\,\mathrm{di}$$

$$\mathrm{da} = 4\,\frac{\cos i}{\mathrm{n.cos\ r}}\,\mathrm{di} - 2\,\mathrm{di}$$

$$\frac{da}{di} = 0 \quad \leftrightarrow \quad 2\cos i = n.\cos r \quad \leftrightarrow \quad 4\,(1-\sin^2 i) = n^2\left(1-\frac{\sin^2 i}{n^2}\right)$$

$$4 = n^2 + 3\sin^2 i$$

Le maximum a lieu pour sin i = $\sqrt{\frac{4-n^2}{3}}$.

Pour n=1,33, sin i = 0,86 soit i=59.2° , r=40° et a=41.6°.

La vitesse de la lumière

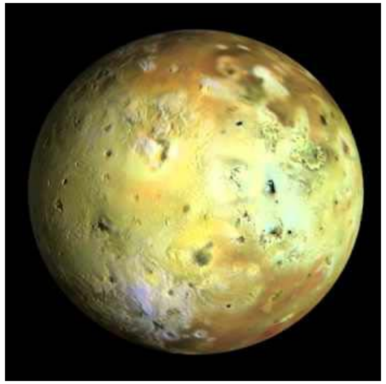
Ole Römer (1644-1710) était un garçon génial, aux yeux plus bleus que la mer Baltique. Souvent, dépassant le port de Copenhague, il allait se promener le long du Sund, ce détroit si mince qu'on avait l'impression de pouvoir le traverser à la nage pour aller en Suède, de l'autre côté, là où le Français Descartes venait de mourir de froid, en l'hiver 1650.

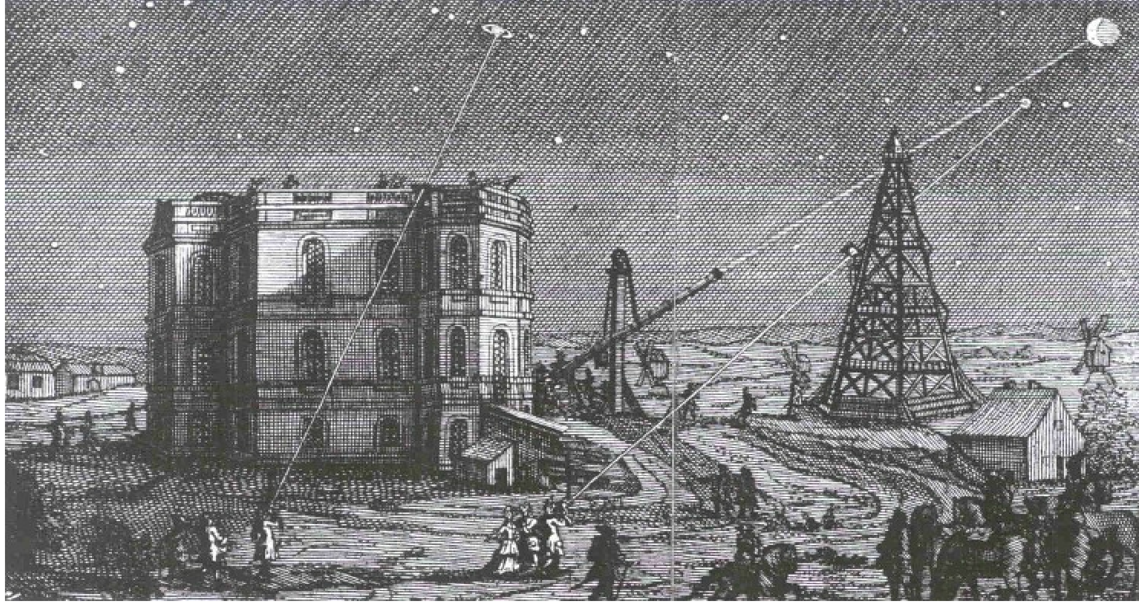
Il aimait surtout l'endroit d'où il apercevait le magnifique château d'Uranie (Uraniborg), que le roi du Danemark avait fait construire, sur l'île de Hveen, spécialement pour son astronome, Tycho Brahé (1546-1601). Ce n'était pas un château pour se défendre ou se protéger, c'était le premier château de la Science, avec un observatoire, une imprimerie et même une fabrique de papier.

C'est pourquoi il éclata de joie lorsqu'en 1671, on lui proposa une place à l'observatoire d'Uraniborg. Là, il s'intéressa particulièrement à l'observation des satellites de Jupiter et à la régularité fascinante de leurs trajectoires devant et derrière Jupiter.

Depuis la découverte par Galilée des quatre lunes de cette immense planète, des mesures précises avaient pu être faites. Et quelques années plus tôt (1668), Jean-Dominique Cassini (premier astronome de Louis XIV) avait publié les premières tables de position de ces satellites.

Le plus gros d'entre eux, Io, tournait autour de Jupiter en 1 jour 18 heures et 30 minutes.





Cassini, qui avait entendu parler de sa passion et de son sérieux, lui proposa de venir travailler au tout nouvel observatoire de Paris pour l'aider à peaufiner ses calculs. Ole avait alors 30 ans …
Toutes les 42 heures et demie, quand il le pouvait, il notait le moment précis où Io disparaissait puis re-apparaissait sur le bord de Jupiter.
Mais depuis quelque temps, il lui semblait avoir remarqué un décalage qui le tracassait beaucoup.

Au moment précis où il s'attendait à revoir le minuscule point noir sur le côté de l'énorme planète, il lui semblait, d'une semaine à l' autre, devoir attendre quelques secondes de plus. Était-ce l'effet de l'impatience ou la lune de Jupiter prenait-elle du retard ? Le ciel était pourtant une fantastique horloge qui ne pouvait prendre ni avance ni retard !

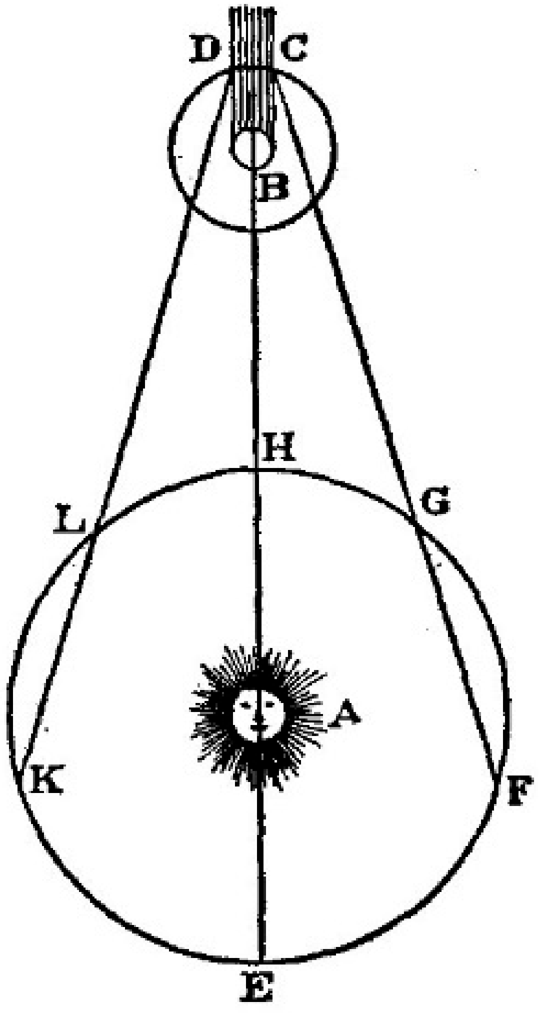
La lumière !

Ce retard pouvait-il être lié au fait que, entre deux observations, la Terre se soit éloignée de Jupiter ? Qu'est-ce qui va de la Terre à Jupiter et qui mettrait alors plus de temps ? La lumière !

Si nous voyons Jupiter c'est que quelque chose franchit l'espace entre Jupiter et nous. Les grains de lumière qui arrivent de Jupiter mettent plus de temps pour nous parvenir !

Après quelques vérifications expérimentales, Römer conclut dans un article du *Journal des Savants* de septembre 1676 :

« Lorsque Jupiter sera de nouveau visible le 9 novembre 1676, le retard de Io sur les tables de Cassini sera de plus de 12 minutes et 30 secondes. »



Calculs

1 ua = 150 millions de km

TerreenA – Jupiter =4 ua

Quand Römer évalua le retard à 12’ 30’’ (soit 750 secondes),1a Terre était alors en C, faisant avec Jupiter et le Soleil un triangle quasi-rectangle :

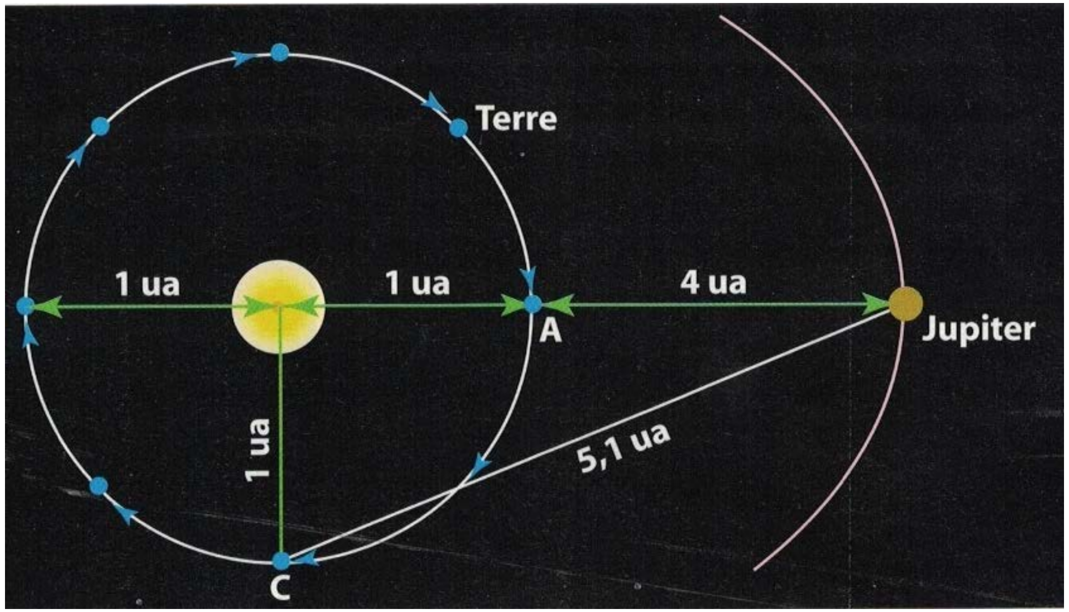
TerreenC - Jupiter = 5,1 ua

La lumière prend donc 750 secondes de retard pour parcourir 1,1 ua de plus :

1,1 x 150 = 165 millions de km.

Et 165/750=0,22 million de km/s.

Nous savons aujourd'hui que la vitesse de la lumière est de 0,3 million de kilomètres par seconde !



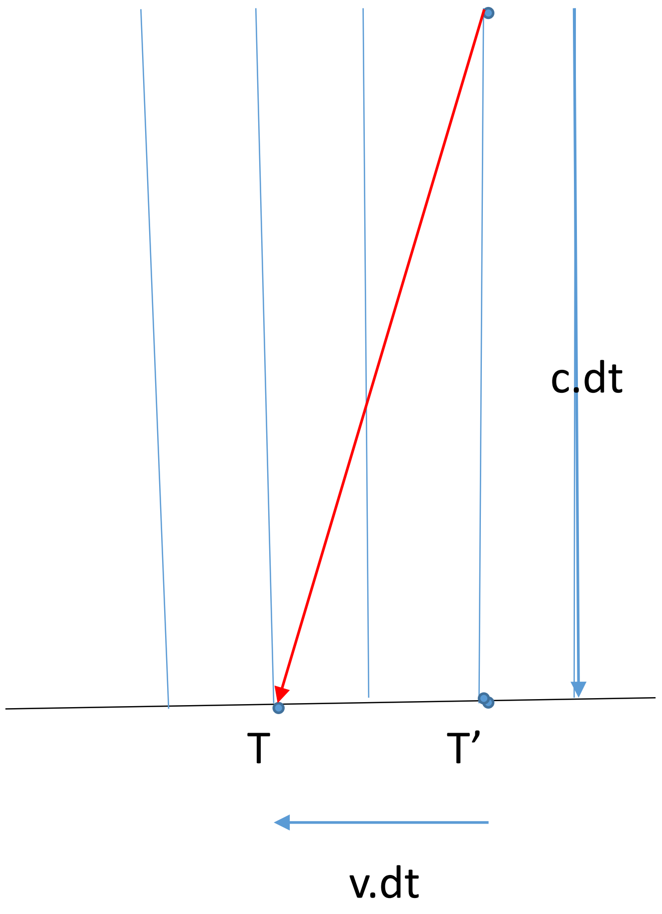
L'aberration stellaire

La Terre se déplace sur son orbite solaire à une vitesse v.

Si la lumière des étoiles arrive à une certaine vitesse c, alors la direction d'où semble venir la lumière d'une étoile n'est pas exactement celle d'où elle vient effectivement.

C'est l'*aberration stellaire, découverte par James Bradley en 1725.*

On a, en radians : $\mathrm{A} = \dfrac{v}{c}$.



Des nombres …

Observant 200 étoiles, pendant un an, Bradley trouva une aberration maximum de 20,2 secondes d'arc, soit 1/10000 radians.

(1'' = $\pi/(180 \times 60 \times 60)$, soit environ 5 millionièmes de radian.)

La Terre parcourt un cercle de 150 millions de kilomètres de rayon en 365,25 jours ; soit en une seconde : $2\pi \times 150\,000\,000 / 365{,}25 \times 86400$ soit 29,85 ; environ 30 km/s.

30 x 10000 = 300 000 !

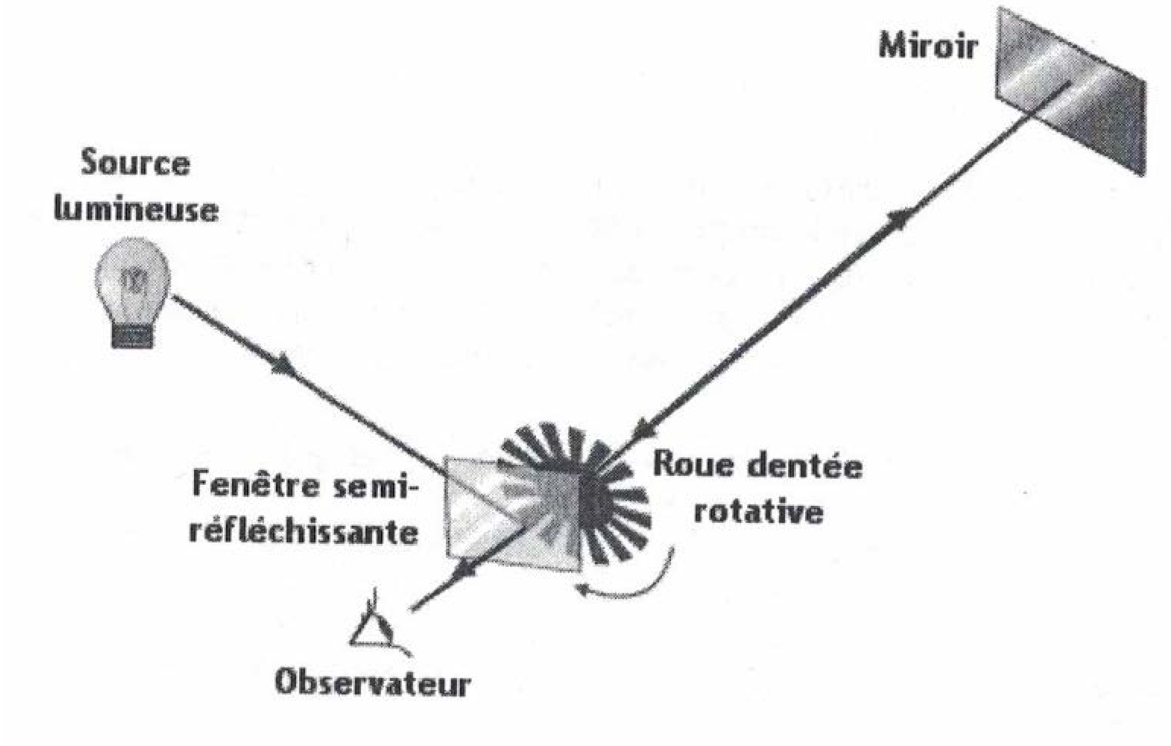
Mesure directe de *c*

Armand Hippolyte Louis Fizeau détermine , en 1849, la vitesse de la lumière, c, en mesurant le temps, t, qu’elle met pour parcourir une distance d : $ct = d$.

d =2×8633 m.

Il utilise une roue dentée a 720 dents.

Pour une certaine fréquence *f* l’observateur ne voit pas de lumière en retour : la roue est exactement passée d'un creux (laissant passer la lumière) à la dent suivante (l’arrêtant). Pendant le temps du trajet, elle a fait 1/1440 ième de tour.



Suresnes Montmartre

Calculs

f étant la fréquence de rotation, en tours par seconde :

$$ft = \frac{1}{1440} \qquad\qquad t = \frac{1}{1440 \times f}\ .$$

Augmentant progressivement la vitesse de rotation de la roue dentée, Fizeau ne voit plus l'image de la source pour une fréquence de rotation de 12,6 tours par seconde :

$c = d\,/\mathrm{t} = 2 \times 8633 \times (1440 \times 12{,}6) \;\; = 313\,000$ km/s .

PHYSIQUE. - *Mémoire sur la vitesse de la lumière* *par* M. ARAGO
***lu à la première Classe de l'Institut, le* 10 *décembre* 1810**

Les anciens croyaient la vitesse de la lumière infinie …

Cette opinion fut ensuite combattue par Alhazen, dans son Traité d'optique, mais seulement par des raisonnements métaphysiques.

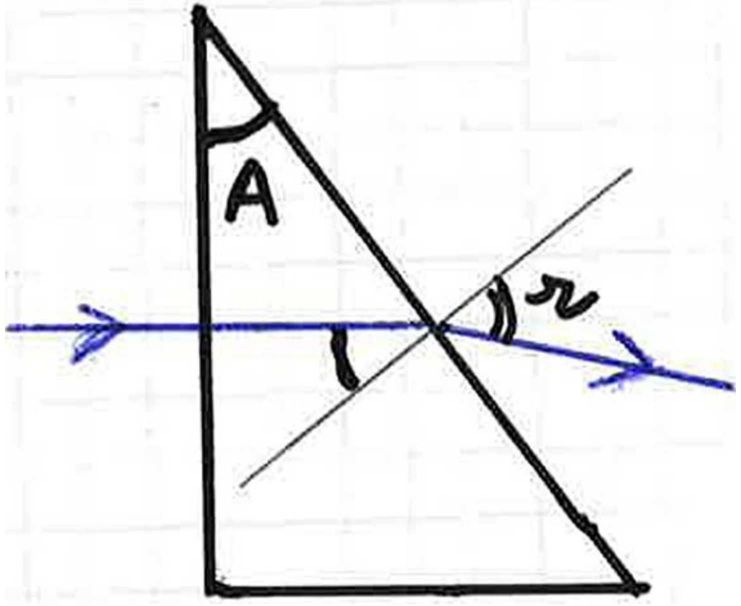
Galilée paraît être le premier qui ait cherché à déterminer cette vitesse par expérience. Dans le premier des dialogues *delle Scienze Nuove*, il fait énoncer par *Salviati*, un des trois interlocuteurs, les épreuves très ingénieuses qu'il avait employées, et qu'il croyait propres à résoudre la question:

Deux observateurs, avec deux lumières, avaient été placés à près d'un mile de distance : l'un d'eux, à un instant quelconque, éteignait sa lumière ; le second ouvrait la sienne aussitôt qu'il ne voyait plus l'autre ; mais, comme premier observateur voyait disparaître la seconde lumière au même moment où il cachait la sienne, Galilée en conclut que la lumière se transmet en un instant indivisible…

Quelques astronomes soupçonnaient que les étoiles émettaient les rayons avec différentes vitesses et il faut convenir que cette idée était à la fois naturelle et probable (les vitesses propres des étoiles étant différentes).

[…]

La certitude des conclusions, qu'on tire à l'égard de la vitesse de la lumière, des observations faites à l'aide des prismes, repose sur le fait qu'une inégalité de vitesse produit une inégalité de déviation.



$$n.\frac{c}{x}.sinA = sinr$$

$$-n.\frac{c}{x^2}.dx.sinA = cosr.dr$$

$$-[n.\frac{c^2}{x^2}.\frac{sinA}{cosr}].d(\frac{x}{c}) = dr$$

$$K.d(\frac{x}{c}) = \ dr$$

On trouve, par ce calcul, que 1/10186 de variation dans la vitesse de la lumière, devait produire, dans mon premier prisme, un changement de déviation égal à 6" ; telles seraient donc les inégalités de déviations que je devrais trouver, si les rayons émis par les diverses étoiles que j'ai observées avaient des vitesses qui différassent entre elles de 1/10000.

Or, en examinant attentivement mes tableaux, on trouve que les rayons de toutes les étoiles sont sujets aux mêmes déviations, quelle que soit la direction du mouvement de la Terre sur son orbite, sans que les légères différences qu’on y remarque suivent aucune loi.

Ce résultat semble être, au premier aspect, en contradiction manifeste avec la théorie newtonienne de, la réfraction, puisqu'une inégalité réelle dans la vitesse des rayons n'occasionne cependant aucune inégalité dans les déviations qu'ils éprouvent !

Henri Poincaré

Albert Einstein

$$E = mc^2$$