

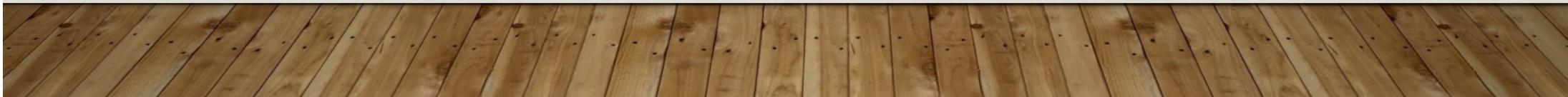
# UNE HISTOIRE DE L'OPTIQUE

---

« LA PHYSIQUE POUR TOUS » SAISON 5 : CYCLE D'ÉTÉ 2023

R. EBER

REGINE.EBER@MAISONS-POUR-LA-SCIENCE.ORG

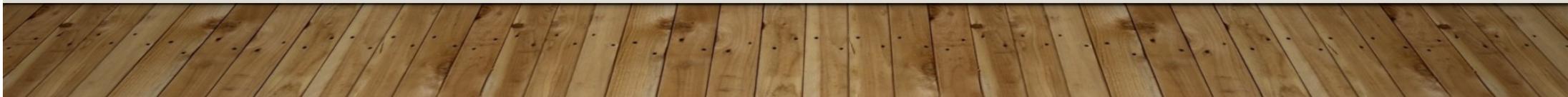


# ÉPISODE I : COMMENT VOIT-ON ? UNE DÉFINITION DE LA LUMIÈRE.

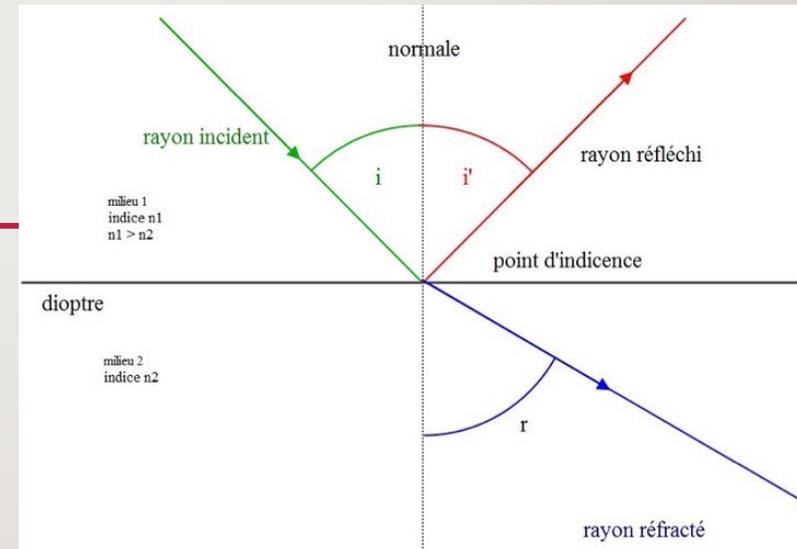
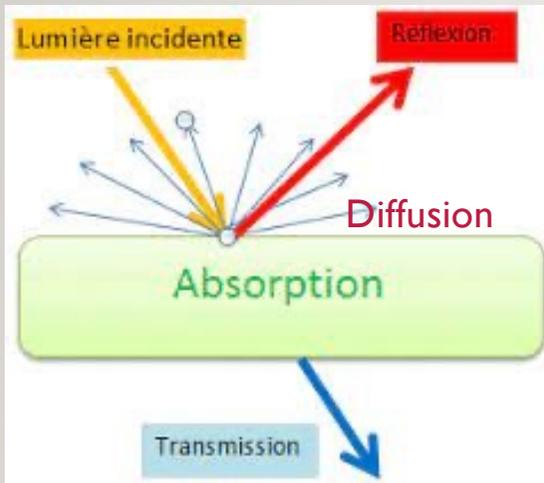
---

## Polysémie de la lumière

- Source de lumière („éteins la lumière“)
- Les zones éclairées („mets toi dans la lumière pour la photo“)
- Clarté du jour („quelle belle lumière !“)
- Dieu
- L'entendement humain („le siècle des lumières“)
- **Le stimulus de la rétine en physique = ce qui permet de voir**



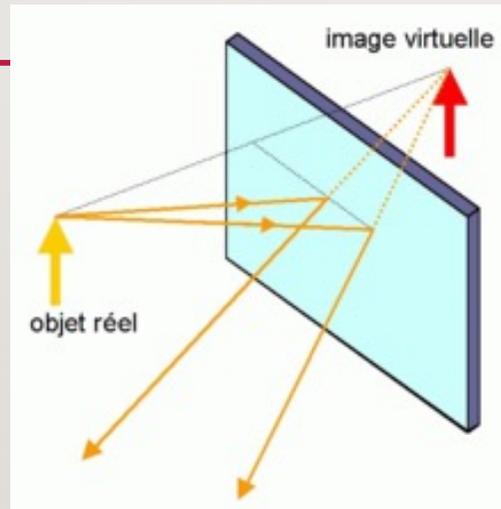
## EPISODE 2 : LA LUMIÈRE RENCONTRE LA MATIÈRE



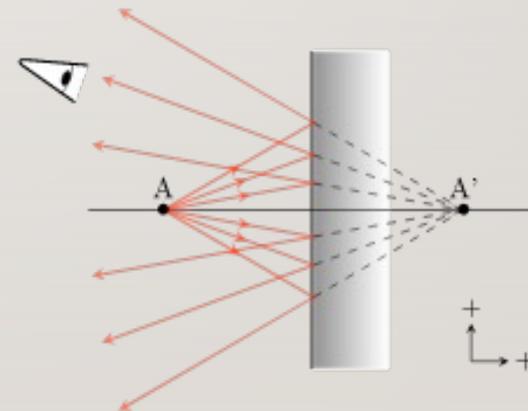
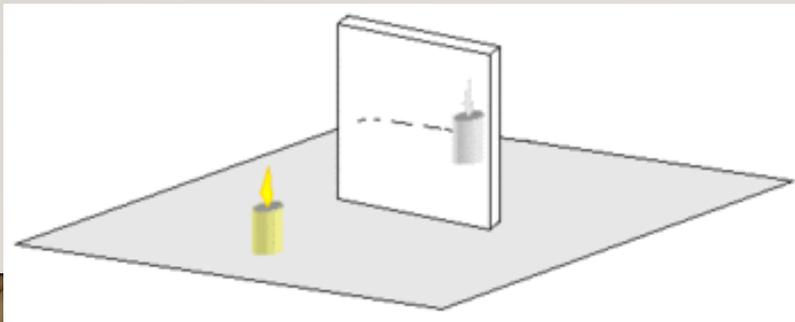
Lois de „Snell-Descartes“ :

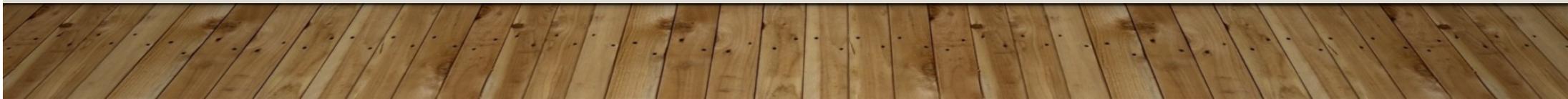
- Les rayons incident, réfléchi, et réfracté se trouvent dans le même plan
- Réflexion :  $i = i'$
- Réfraction :  $\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_2}{v_1}$  ou  $\frac{\sin i}{\sin r} = \text{constante}$  qui dépend des milieux

# LA RÉFLEXION : DÉTAIL



- Image virtuelle
- Image = symétrique de l'objet par rapport au miroir
- Stigmatisme  
→ ANALYSE PUREMENT GEOMETRIQUE POSSIBLE

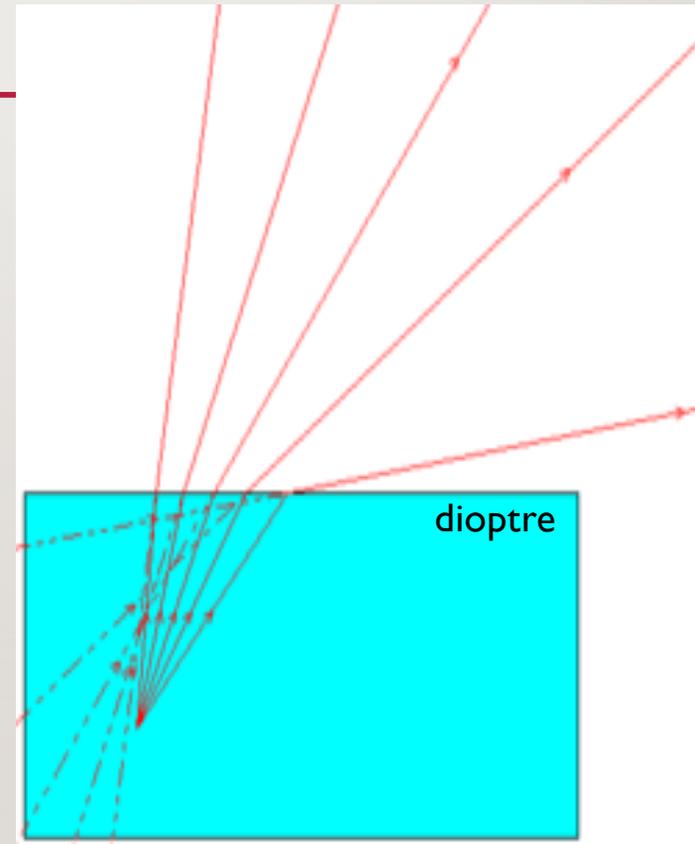






# LA RÉFRACTION EAU→AIR : DÉTAIL

- Image virtuelle
- Image plus haute que l'objet
- Pas de stigmatisme (plus mon regard est rasant, plus l'objet semble haut)



# IMAGE DE LA PIÈCE IMMERGÉE

Œil placé dans l'air au-dessus de la pièce  
Œil qui ne reçoit que des rayons presque  
verticaux

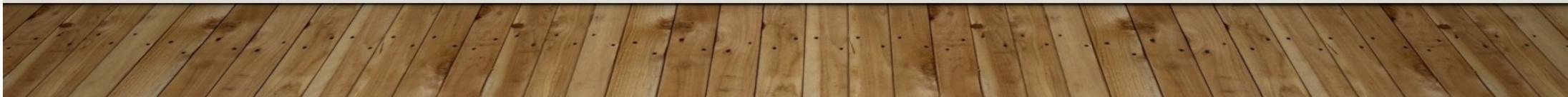
Voit l'image de la pièce, qui se trouve à  
l'intersection des rayons réfractés, au-  
dessus de la pièce réelle.



# OBSTACLES ÉPISTÉMOLOGIQUES :

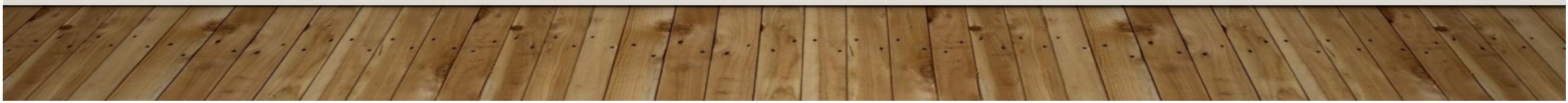
---

- Difficulté de passer d'un effet global à une analyse rayon par rayon
- Nécessité de tracer une „normale“ pour avoir des relations mathématisables entre les angles.
- La relation de la réfraction :
  - Dépend de la vitesse de la lumière dans les milieux 1 & 2
  - Pas de stigmatisme par réfraction sur un dioptré plan
- Les images virtuelles se trouvent dans le prolongement des rayons réfléchis ou réfractés



# 2. EVOLUTION HISTORIQUE DE LA RÉFLEXION ET DE LA RÉFRACTION

---



# MIROIR EN BRONZE DE L'ÉPOQUE DE RAMSÈS II (-1200)

---

« ...le miroir à main d'une autre princesse, Sath-Hathor-Iounet : l'objet est un petit chef-d'œuvre, dont le manche en obsidienne est orné du visage en or de la déesse Hathor, une représentation supposée conférer la beauté à l'utilisatrice du miroir ».

Le Monde, 7 avril 2023



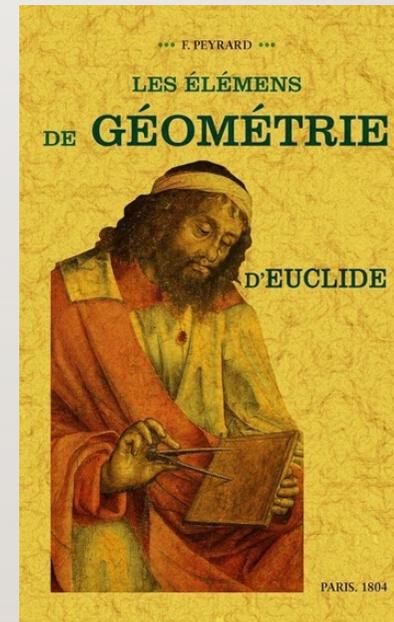
# EUCLIDE (VERS -300) : TRIOMPHE DE LA GEOMETRIE

---

- „optique“

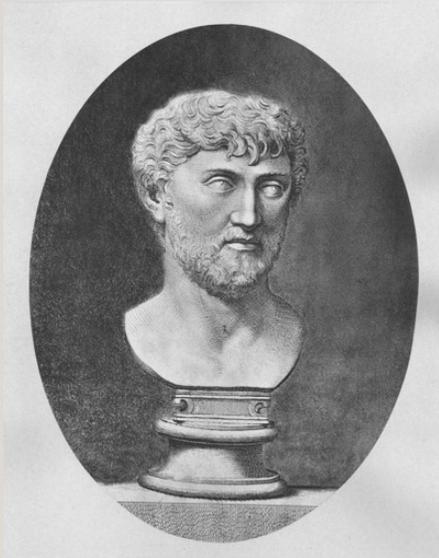
→ Loi de la réflexion

Par analogie avec une flèche qui rebondit  
sur un bouclier



# LUCRÈCE (-98 -55) „DE RERUM NATURA“ :

- Objet brisé dans l'eau (rames d'un bateau) = effet de la réfraction
- Miroir et loi de la réflexion livre IV, 309-330



Quand la plaque est taillée à facettes, les traits  
Gardent en s'y mirant leur place et leur sens vrais ;  
Soit que, se transmettant de facette en facette.  
L'image qui nous vient par deux fois se reflète ;  
Soit qu'elle se retourne en route et que les plis  
L'engagent à rouler sur les angles polis.  
Le reflet suit nos pas et nos gestes ; il semble  
Que nos pieds et les siens se déplacent ensemble ;  
C'est qu'il passe avec nous dans le champ du miroir :  
Le point que nous quittons ne peut le recevoir.  
Il faut qu'avec l'objet l'image coïncide ;  
Un angle invariable à leurs rapports préside.

Notre œil redoute et fuit un éclat trop ardent.  
Le soleil que l'on fixe aveugle l'imprudent ;

320

Extrait de „la nature des choses“ (de rerum natura) livre IV

# CLAUDE PTOLÉMÉE (+90 +160) A LA BIBLIOTHÈQUE D'ALEXANDRIE

---

- „L'almageste“ → géocentrisme + tables de trigonométrie

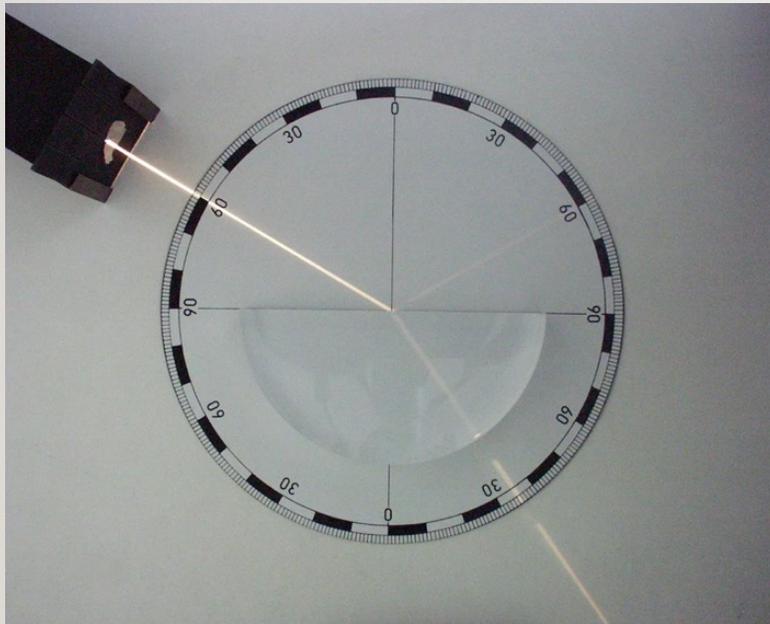


„l'optique“ en large partie perdue :

- Tables de réfraction obtenues avec un appareillage → expérimentation (rare dans l'Antiquité).
- Correspondance entre l'angle d'incidence  $i$  et sa déviation  $r-i$

# FAIRE DES MESURES DE REFRACTION AU 1ER SIECLE...

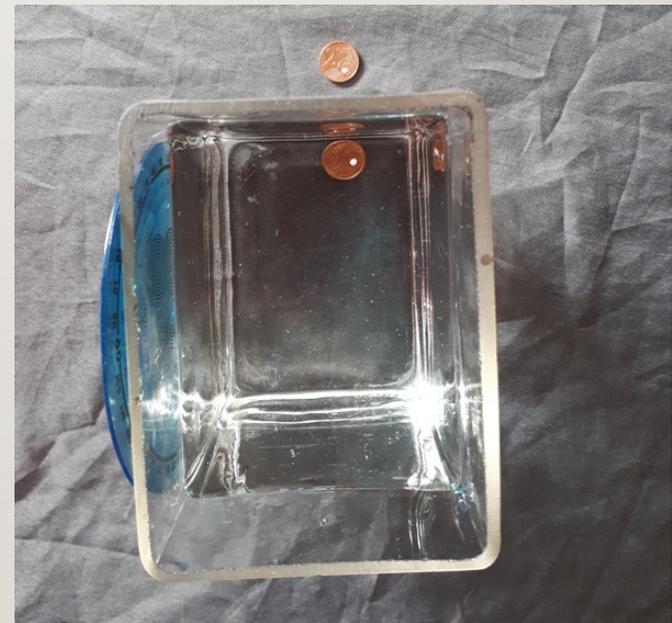
---



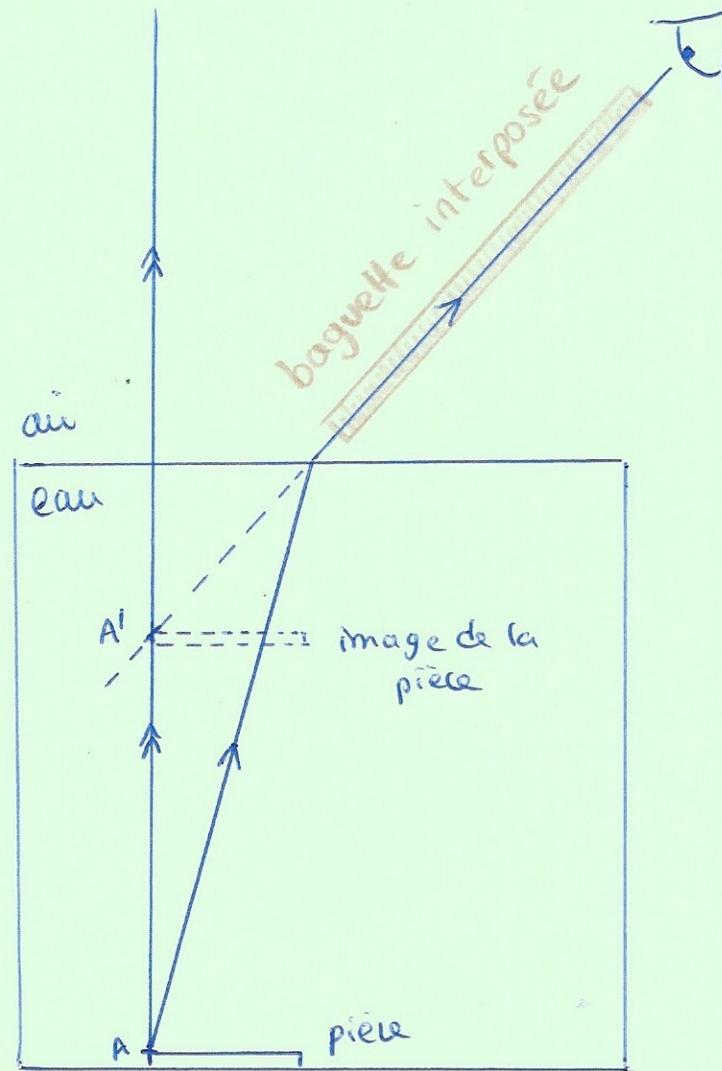
- UNE LAMPE QUI DONNE UN PINCEAU FIN ???
  - UN DISQUE GRADUE ???
  - UN DEMI CYLINDRE EN PLASTIQUE ???
- Certainement pas de cette manière-là !

# A L'ÉPOQUE DE PTOLÉMÉE : CUVE À EAU ET RAPPORTEUR

---

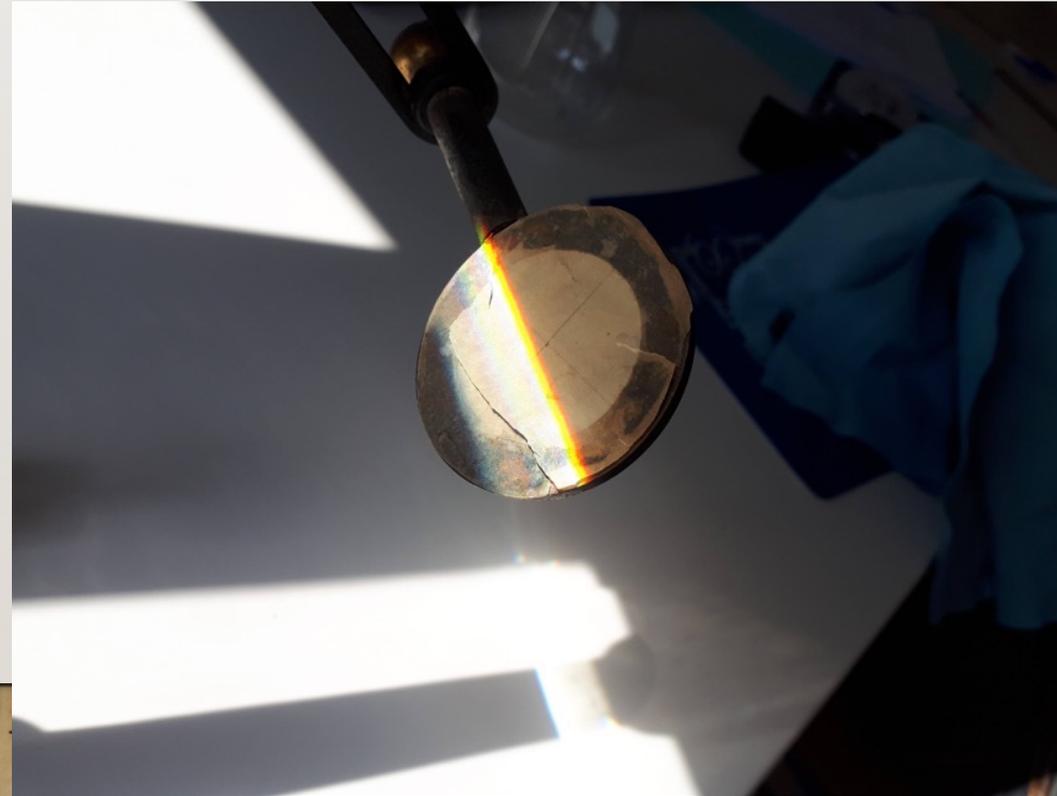


- On procède par visées successives de l'image (en interposant une baguette entre l'œil et l'image de la pièce), avec des positions d'œil différentes. La baguette a la direction du rayon réfracté.

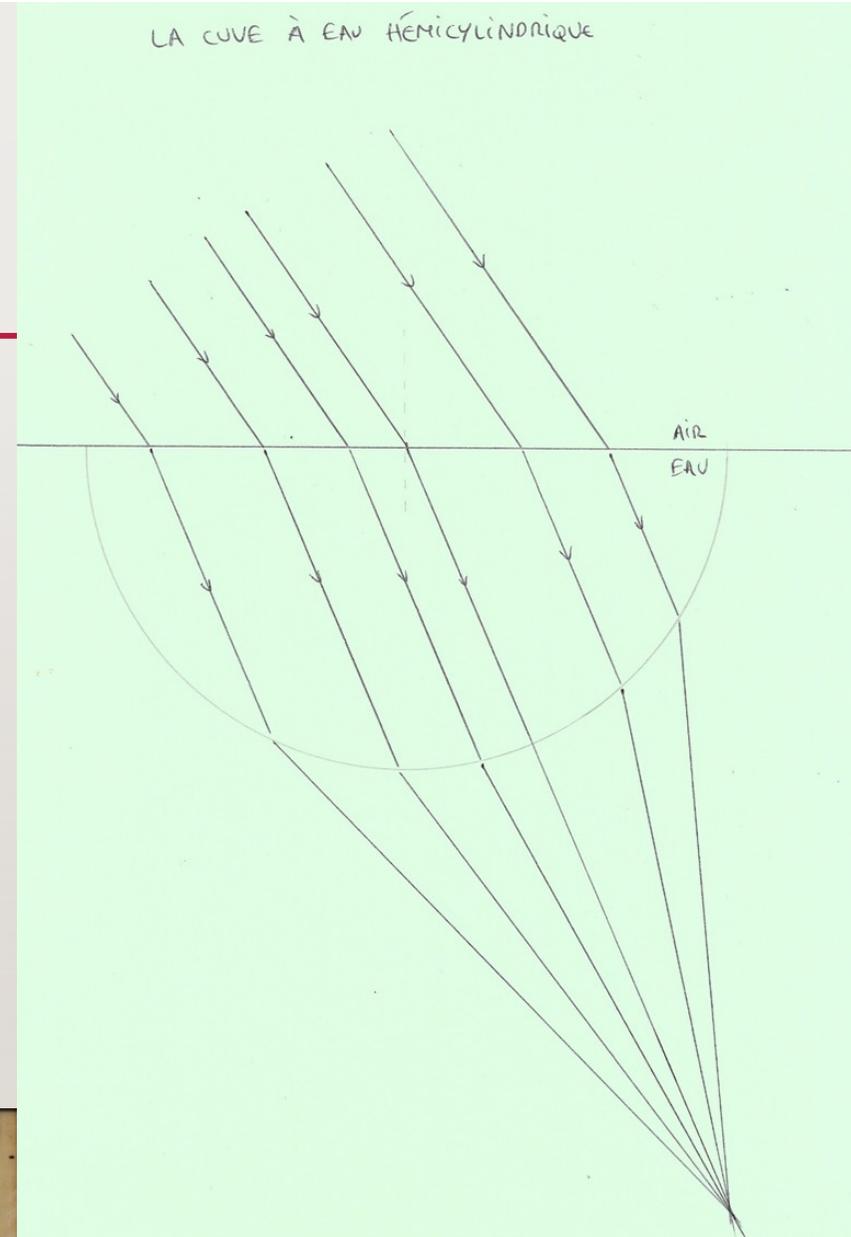


DISPOSITIF PLUS RÉCENT : CUVE À EAU HÉMICYLINDRIQUE  
(FONCTIONNNE AVEC LES RAYONS DU SOLEIL) AVEC BRAS ARTICULES.

---



- Mais dans ce dispositif le dioptre sphérique provoque une focalisation, qui se fait heureusement dans la direction du seul rayon qui n'est pas dévié par la face courbe. Donc on peut obtenir ici une table de réfraction air-liquide.
- Le bras articulé en haut ne sert qu'à connaître la direction des rayons solaires incidents.



# ABÛ AL-KINDI (796 À 873) DE LA MAISON DE LA SAGESSE DE BAGDAD, LE „PHILOSOPHE DES ARABES“

---

- Miroir ardent



# UNE LÉGENDE....ARCHIMÈDE AURAIT REPOUSSÉ LA FLOTTE ROMAINE AVEC DES MIROIRS ARDENTS

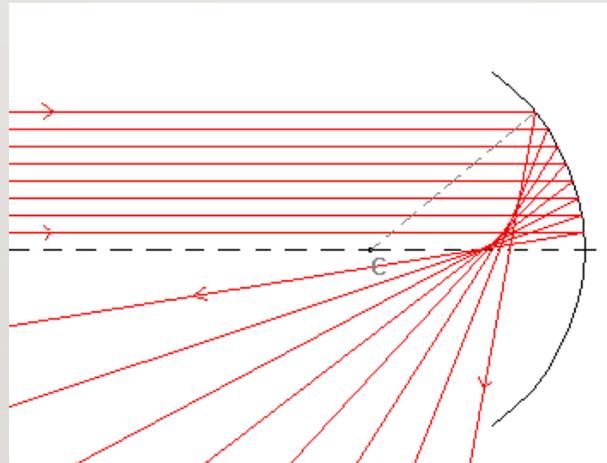
---



Miroir Ardent d'Archimède

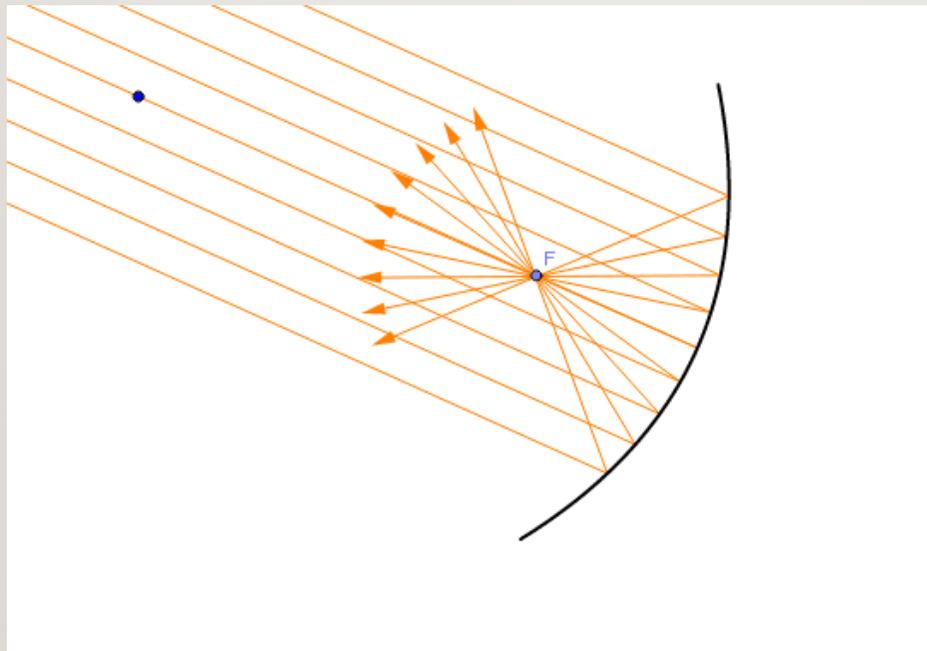
# EFFET D'UN MIROIR ARDENT SPHÉRIQUE → PAS DE STIGMATISME

---



# EFFET D'UN MIROIR PARABOLIQUE → STIGMATISME

---



EHRENFRIED WALTHER VON TSCHIRNHAUS, MIROIR ARDENT,  
KIESLINGSWALDE, 1686. DRESDE, STAATLICHE KUNSTSAMMLUNGEN,  
MATHEMATISCH-PHYSIKALISCHER SALON.

---





# DEUX INVENTIONS MAJEURES A L'EPOQUE ARABE

---

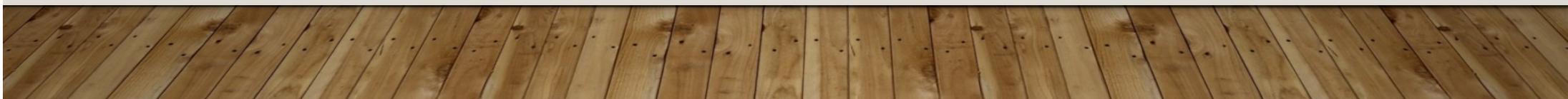
- 8ème siècle : importation du papier de la Chine
- Début 9ème siècle : Al Khwarizmi importe d'Inde le système de numération décimal indien (numération de position)



# IBN SAHL (940 À 1000)

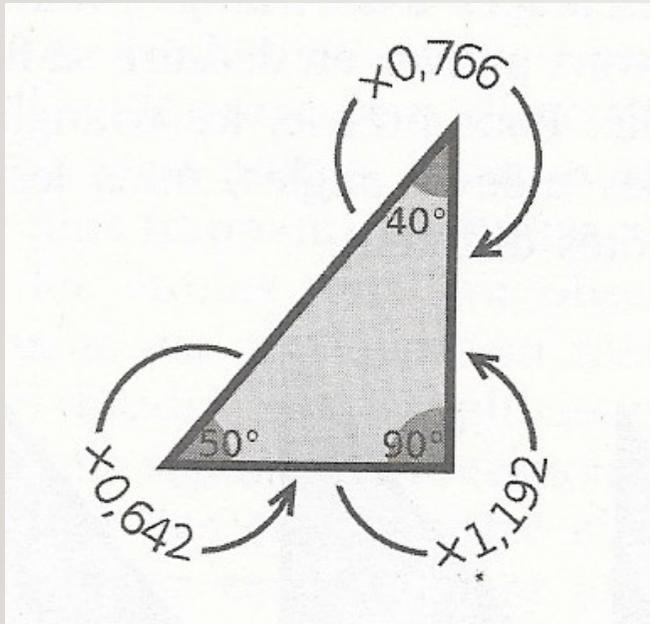
---

- La réfraction de la lumière :  
**importance de la normale**
- Miroirs ardents puis „sphères ardentes“
- Loi de la réfraction pour le cas particulier air-verre avec des sinus



# LES TABLES DE TRIGONOMETRIE DE HIPPARQUE DE NICÉE (-2ÈME SIÈCLE) DANS L'ALMAGESTE (+2ÈME SIÈCLE)

---



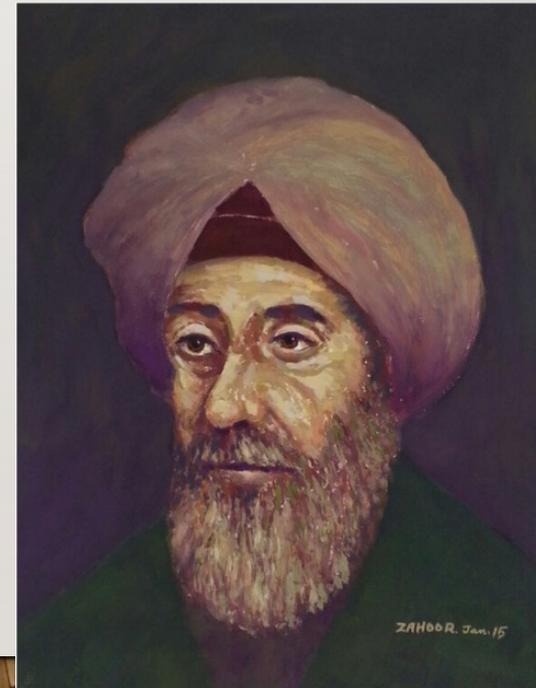
- $\cos 50 = 0,642$
- $\sin 50 = 0,766$
- $\tan 50 = 1,192$



# AL HASAN IBN AL HAYTHAM „ALHAZEN“ (965 À 1040) LE CAIRE, LE HELMHOLTZ DU MOYEN AGE

---

- **Lois de la réflexion** par analogie avec une balle rebondissante
- Expériences avec sphère ardente
- Énoncé du principe de retour inverse



# LA DÉMARCHE SCIENTIFIQUE

---



# 13<sup>ÈME</sup> SIÈCLE....

---

- **Invention des lentilles de verre** (à partir des défauts des vitraux)
- Pierre de lecture
- Puis verre de lunettes à main, à clou, en pince nez, à branches
- Verre de myope au 15<sup>ème</sup> siècle



# LA MÉGA SYNTHÈSE DE WITELO

---

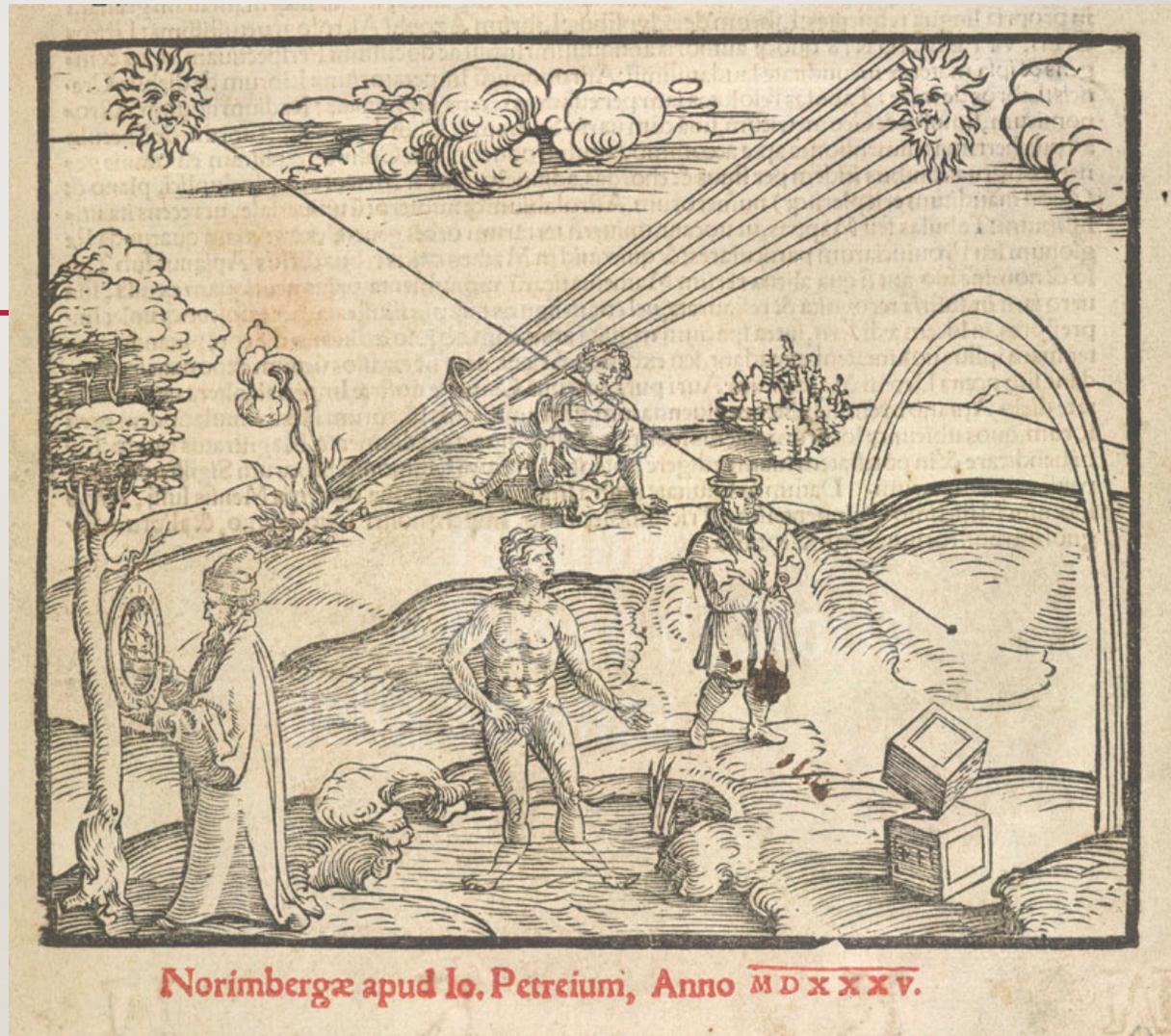
- Witelo ou Vitelo ou Vitellonis (1220-1278) : une méga synthèse qui sera publiée en 1572



- Propagation rectiligne, ombres
- Vision
- Illusions d'optique
- Réflexion (miroirs de toutes formes)
- **Tables de réfraction : la déviation est plus importante lorsque la différence de densités des milieux est grande. Nécessité pour l'astro**
- **Mais les expériences n'ont pas été refaites**

# LES BASES DES IDEES SUR LA VISION

- Des phénomènes naturels (réflexion à la surface de l'eau, objet partiellement immergé, image dans une goutte d'eau, arc-en ciel...)
- Des artefacts (miroirs en bronze, verres, loupes en obsidienne ...)



Frontispice  
du livre  
imprimé  
« de la  
magie » de  
Witelo  
(1535)

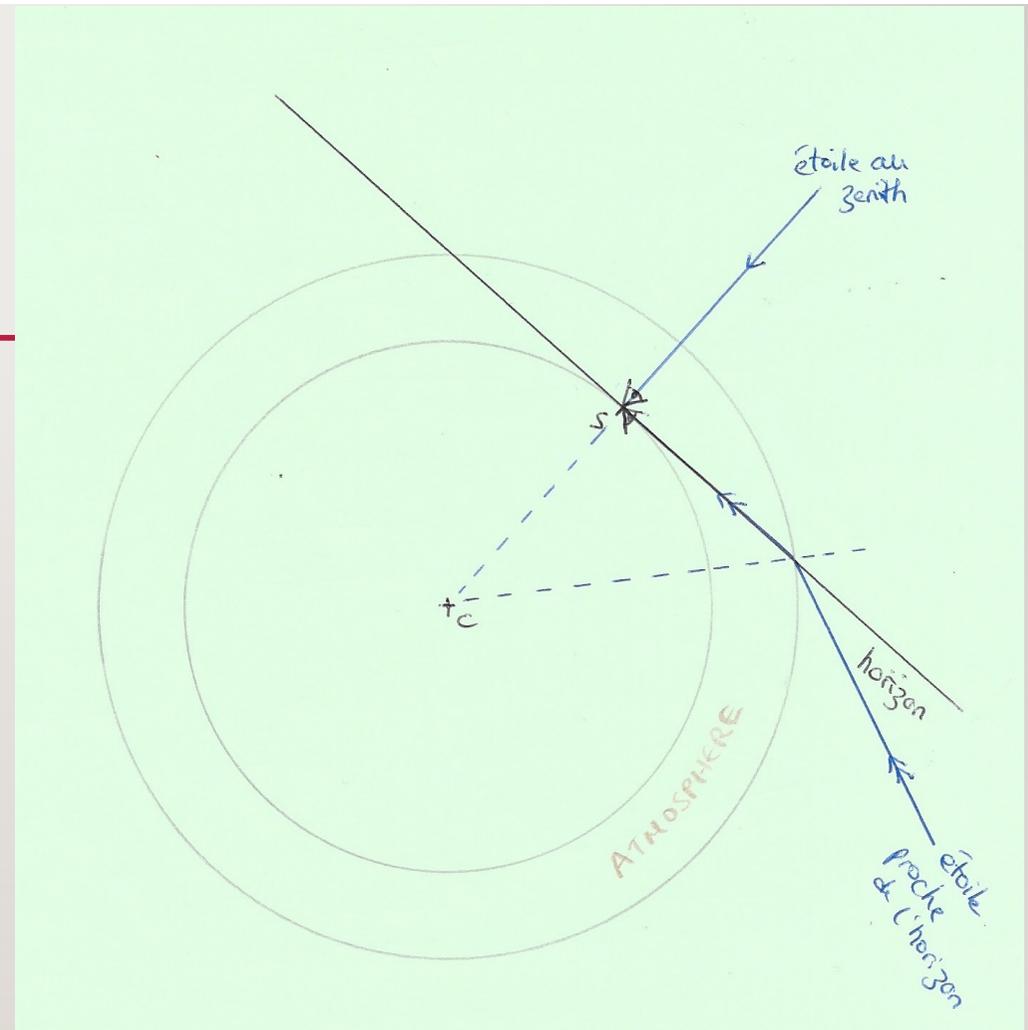
# TYCHO BRAHÉ ET LA PRÉCISION DES OBSERVATIONS

- Précision de 2' au lieu de 10' avant
- Rapporteurs géants
- Pb de la réfraction atmosphérique



# LA REFRACTION ATMOSPHERIQUE

- Considérons la Terre de centre C. Je me trouve à Strasbourg (point S).
- Les rayons lumineux que m'envoie une étoile au Zenith sont peu réfractés par l'atmosphère ; ceux que m'envoie une étoile à l'horizon le sont beaucoup.  
Conséquence : la position d'une étoile par rapport aux constellations connues change quand elle est vue à l'horizon.



# JOHANNES KEPLER (1571-1630) ET LA LOI DE LA REFRACTION

---

- Il publie « paralipomènes à Vitellion » (ou astronomiae pars optica), en 1604.

LOI DE LA REFRACTION :

$$i = r + ki/\cos r$$

- En 1611 « la dioptrique »

LOI DE LA REFRACTION :

$$r = i/2 \text{ si } i \text{ est petit}$$

→ Pas de loi de la réfraction

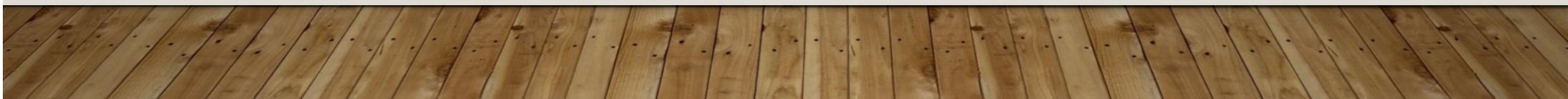


- 
- „Il faut pour être perçus que les espèces ou les rayons provenant des choses aillent toucher les surfaces internes de l'oeil. Celui-ci ne peut donc saisir les déviations produites en dehors de lui par un miroir ou un milieu réfringent, et situe toujours l'objet dans la direction d'où il reçoit les rayons“

GW t2 p65

- „quand en effet je me disais que l'image de l'objet sous l'eau ... Est basse quand on regarde à la verticale, qu'elle se relève lorsque l'oeil se détourne vers l'horizon“

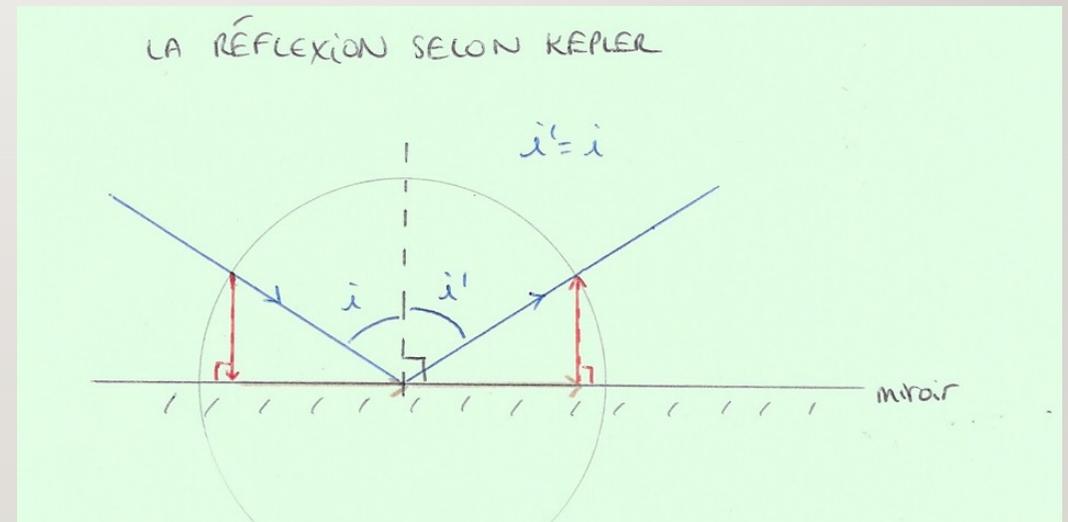
Kepler GW t2 p88



# LA REFLEXION ET LA RÉFRACTION CHEZ KEPLER

- Explication de la réflexion par les composantes :

Sur un miroir horizontal, la composante horizontale n'est pas affectée, seule la composante verticale l'est (elle est inversée)



- 
- Explication confuse pour la réfraction :

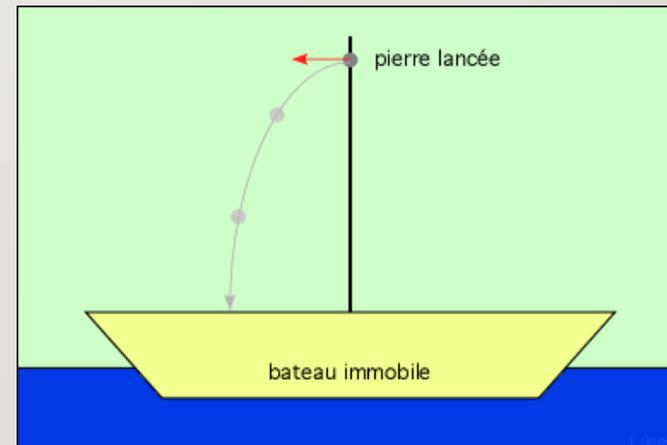
Sur un dioptré horizontal, la composante horizontale (la plus fragile) est affaiblie par le passage : rapprochement de la normale  
→ Explications confuses



# POURQUOI DÉCOMPOSER LE CHEMIN DE LA LUMIÈRE ?

---

- Dialogue sur les deux systèmes du monde, Galilée 1632
- La décomposition du mouvement en composantes est dans l'air du temps.



# LA LOI DES SINUS (REFRACTION) DÉCOUVERTE AU MÊME MOMENT PAR

---

- RENE DESCARTES (1596-1650)



- WILLEBRORD SNELL (1580-1625)



Pb d'antériorité.

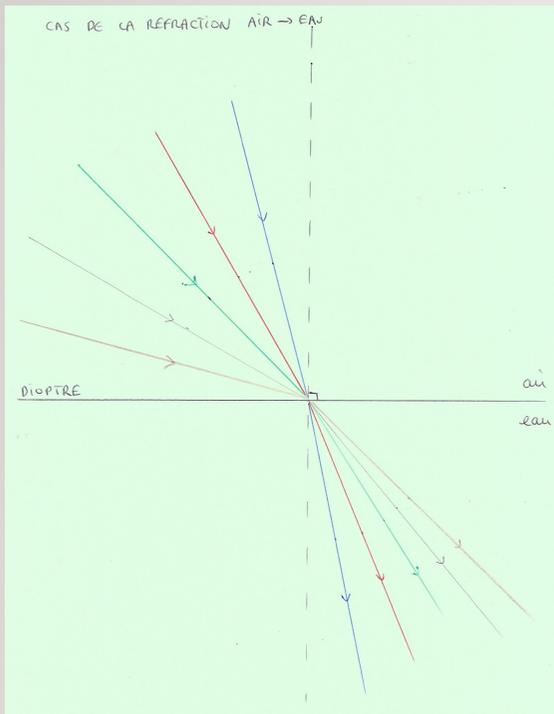
Descartes publie la loi dans « la dioptrique » en 1637 ; Snell meurt sans avoir pu publier. Il ne sera connu que par Huygens en 1703 « dioptrica »

# FORMULATION DE LA LOI DES SINUS

---

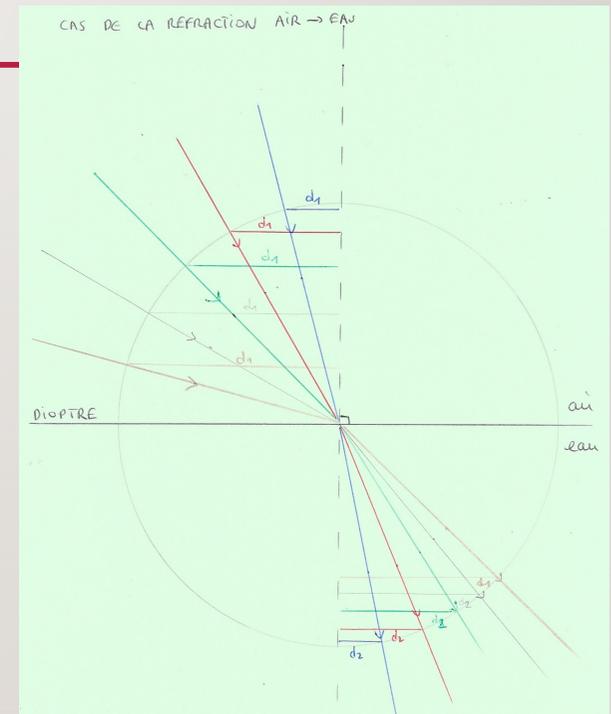
- $\frac{\sin i}{\sin r} = \text{constante}$
- La lumière se rapproche de la normale quand elle va vers un milieu plus „dense“ et inversement.

## ...MAIS SANS UTILISER DES SINUS



Descartes et Snell ont formulé la „loi des sinus“ sous une forme de type :  $\frac{d_1}{d_2} = cst$

En prenant en compte des rayons incident et réfracté de même longueur, et le rapport de leurs longueurs de projection sur le dioptré,  $d_1$  et  $d_2$ .



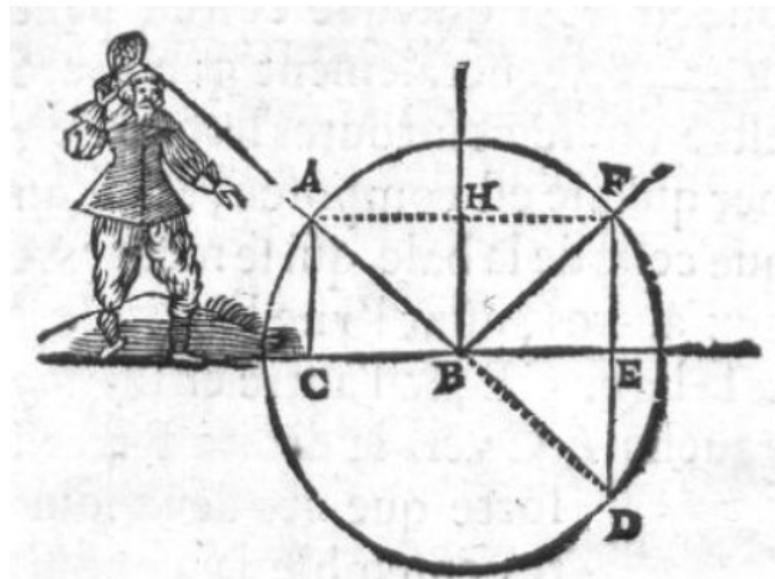
# EXPLICATIONS DE LA RÉFRACTION AIR → EAU CHEZ DESCARTES : ANALOGIE BALISTIQUE

---

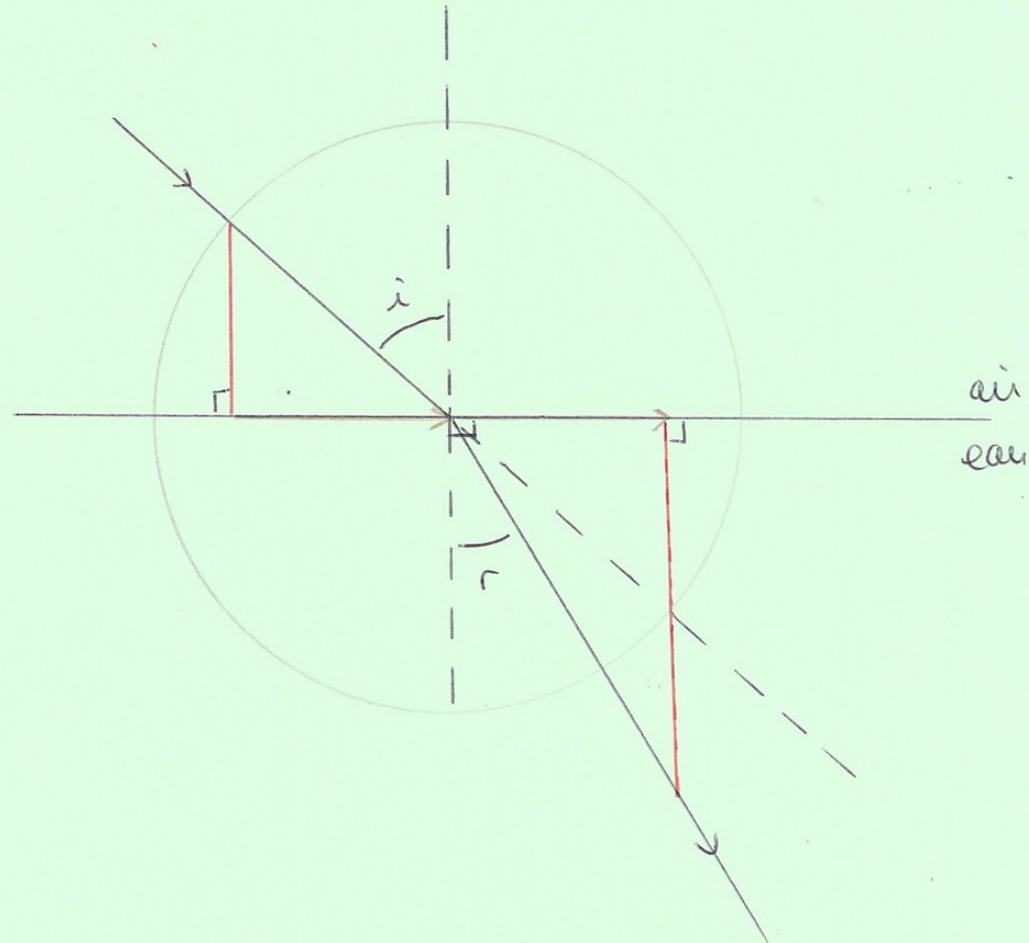
- Chez Descartes :
  - Analogie avec une balle
  - Seule la composante  $V$  est affectée : elle doit s'allonger (le rayon se rapproche de la normale)

Donc pour Descartes la vitesse de la lumière est plus grande dans l'eau que dans l'air.

Figure 5



ANALOGIE BALISTIQUE DANS LE CAS DE LA  
RÉFRACTION AIR  $\rightarrow$  EAU SELON DESCARTES ( $r < i$ )

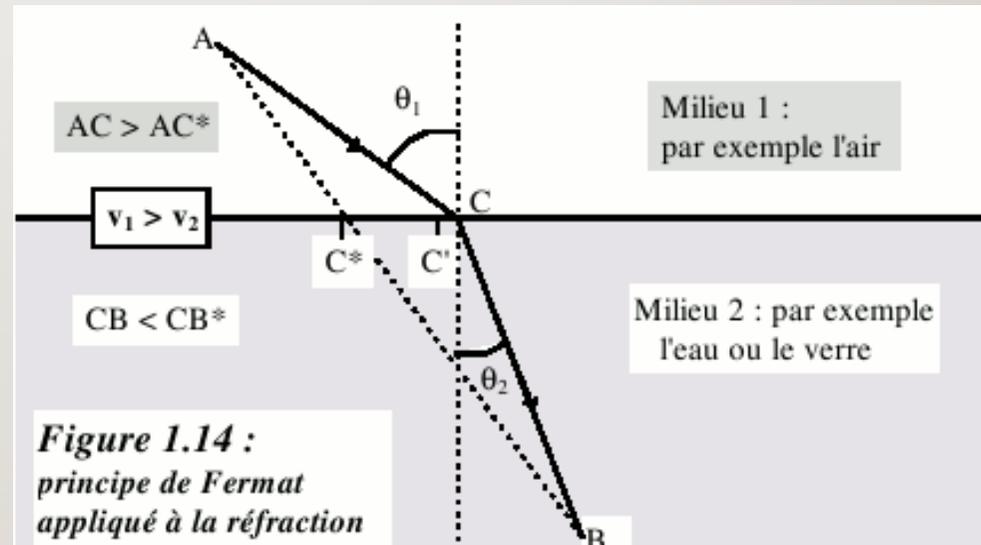


# PIERRE FERMAT (1601 ?-1665) : POURQUOI LA LUMIÈRE EST DEVIÉE SUR UN DIOPTRE ? → POUR GAGNER DU TEMPS !

- le principe (téléologique) de Fermat : La lumière emprunte le chemin qui correspond au temps de parcours minimal

OU c'est dans le milieu où la lumière est la plus rapide qu'elle va parcourir une distance plus grande !

- Principe de cause finale (Aristote)
- La vitesse de la lumière est plus grande dans l'air que dans l'eau



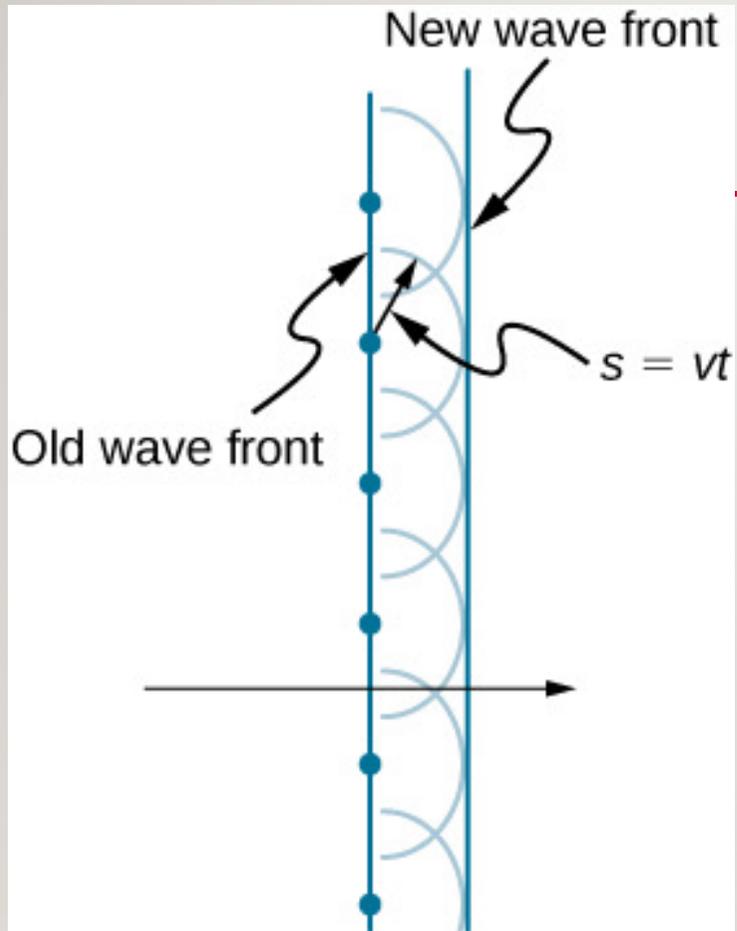
# CHRISTIAAN HUYGENS (1629-1695)

---

- Royal society 1662
- Académie royale des sciences 1666  
(Huygens et Cassini)
- Observatoire de Paris 1667
- Philosophical transactions 1665
- Journal des savants 1665
- Salons de physique
- Développement critique du cartésianisme

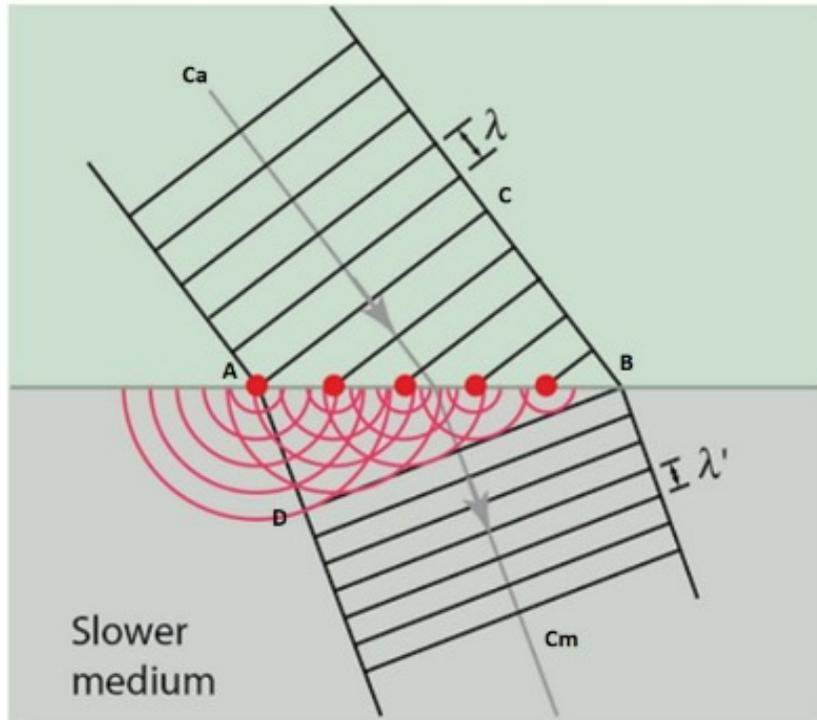


# LE TRAITÉ DE LA LUMIÈRE 1690



- Hypothèse : chaque point touché par de la lumière est la source d'une onde circulaire secondaire.
- Quand on est loin de la source, l'onde est plane.

# PASSAGE D'UNE ONDE VERS UN MILIEU OÙ SA VITESSE EST MOINDRE.



- Le temps mis par bout du front d'onde plane pour parcourir la distance CB est le même que celui qui est mis par l'autre bout du front d'onde pour parcourir la distance AD.

$AD < CB$  car ici  $v_2 < v_1$

- Huygens montre que

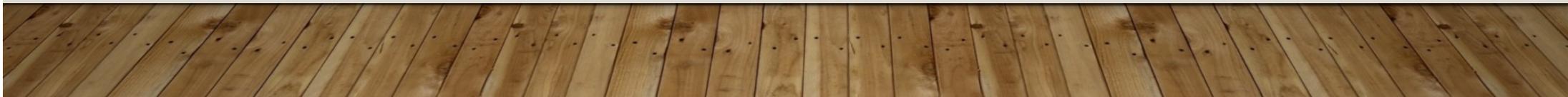
$$\frac{\sin i}{v_1} = \frac{\sin r}{v_2}$$

- Comme la lumière se rapproche de la normale ici, c'est que la vitesse de la lumière est plus faible dans les milieux denses.

# 1703 « L'OPTIQUE » DE NEWTON : UN MODÈLE CORPUSCULAIRE

---

- La lumière est faite de corpuscules qui se propagent à une vitesse énorme
- Propagation rectiligne → ils ne subissent aucune force hormis la force d'inertie
- Explication de la réfraction grâce à une force perpendiculaire au dioptre :
  - Force accélératrice approche le « rayon » de la normale (si  $v_2 > v_1$ )
  - Force de freinage éloigne le « rayon » de la normale (si  $v_1 > v_2$ ).
  - Pb des frottements : lorsque les corpuscules de lumière entrent dans le milieu plus dense, elle devraient ralentir ! → explication de Newton (hypothèse ad hoc) : les corps solides transparents ont bcp de pores et les corpuscules qui rencontrent d'autres particules sont arrêtés (intensité transmise est faible).



# LES COULEURS OBTENUES AVEC LE PRISME (1666)

---

- Les corpuscules bleus sont les plus déviés par le prisme, donc ils sont les moins lourds.

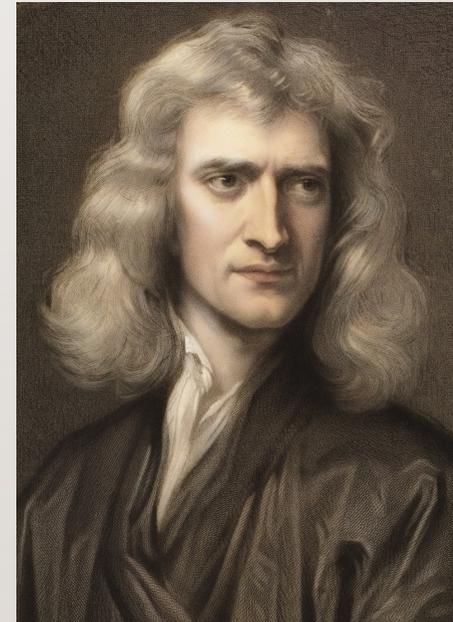


© Belin Education/Humensis, 2019 Physique Chimie 2nde  
© Bridgeman Images

# ISAAC NEWTON (1642-1727) LE SPIRITUEL

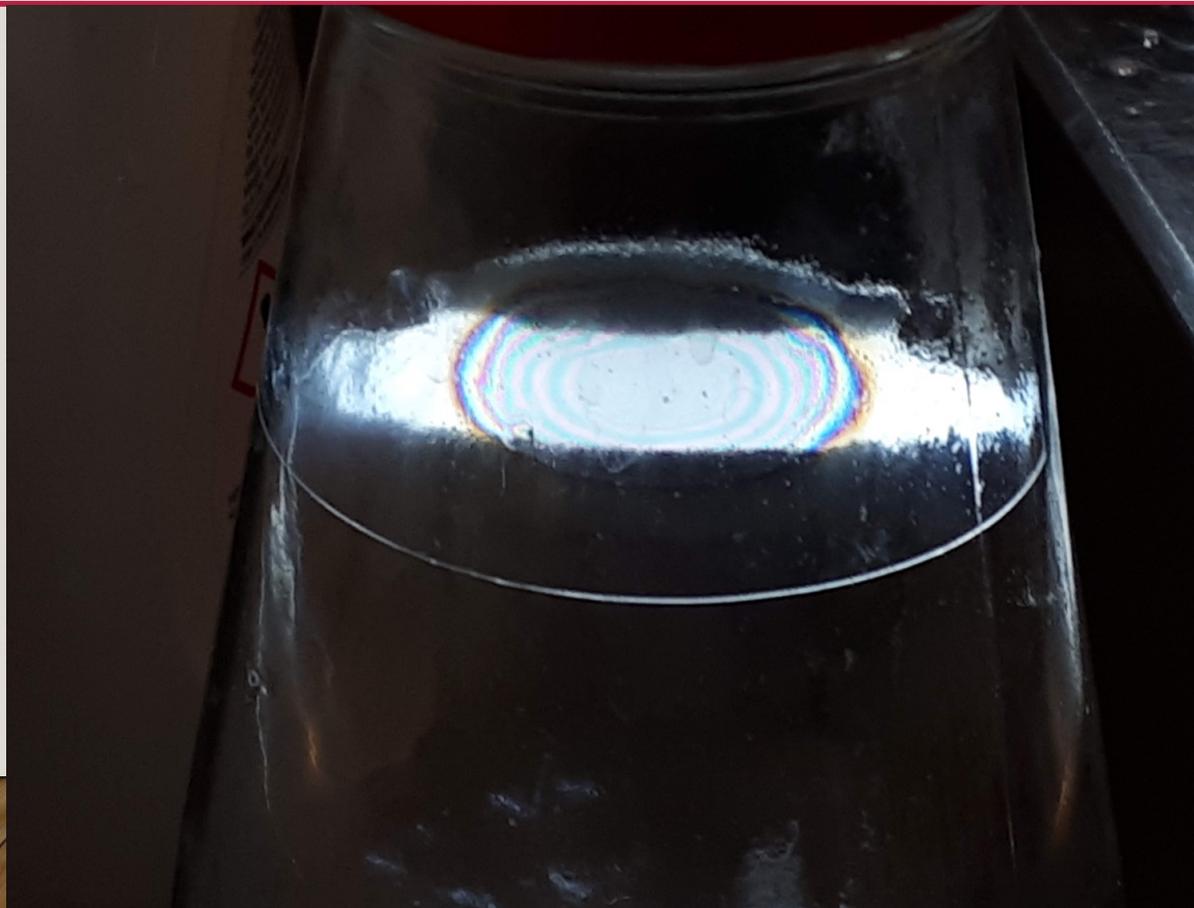
---

- Newton avance 7 couleurs pour l'arc-en-ciel, comme les 7 notes de la gamme pour inscrire ses découvertes dans un ordre du monde voulu par Dieu.
- 7 jours de la création, 7 péchés capitaux, 7 branches de chandelier...
- Beauté et cohérence de l'œuvre de Dieu.



# EXPÉRIENCE DES ANNEAUX DE NEWTON... ???

---



## BILAN :

---

- Interprétation Newton-Descartes : la vitesse de la lumière dans l'eau est supérieure à celle dans l'air (modèle balistique corpusculaire de la lumière)
- Interprétation Fermat-Huygens : la vitesse de la lumière dans l'eau est inférieure à celle dans l'air (principe de Fermat ou modèle ondulatoire de la lumière)
- C'est le deuxième modèle qui sera confirmé par les mesures ! → la lumière est donc une onde.
- Le modèle corpusculaire / balistique est éliminé lentement (rayonnement intellectuel de Newton).



# CONCLUSION

---

- Les lois, une fois établies, ne sont plus remises en question :

**$i = i'$  (-3<sup>ème</sup> siècle)**

**$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_2}{v_1}$  (*relation de Huygens*,**

**17<sup>ème</sup> siècle)**

- L'établissement de la loi de la réfraction a permis de sortir d'une controverse sur la nature de la lumière : le modèle corpusculaire est (temporairement) éliminé.
- La lumière est vue comme une onde à la fin du 17<sup>ème</sup> siècle.