

# Optique Géométrique

Marcel Carbillet [[marcel.carbillet@univ-cotedazur.fr](mailto:marcel.carbillet@univ-cotedazur.fr)]  
(Dépt. de Physique/Astrophysique & Laboratoire Lagrange)

—> Cours et TD : <https://lagrange.oca.eu/carbillet/enseignement/>  
puis cliquer sur : L1 Biologie - Optique Géométrique  
(mis à jour après chaque CM, cours de l'an dernier dans « old/ » )

# Déroulé/Modalités/Bibliographie/Ressources en ligne

## Plan du cours :

I Introduction

II Réflexion & miroir plan

III Réfraction & dioptré plan

IV Miroirs sphériques

V Dioptrés sphériques

VI Lentilles

VII Instruments optiques (appareil photo, loupe, microscope, œil)

Modalités pratiques : 4 CM de 2h, 5 TD de 2h, 1 examen final.

## Bibliographie et ressources en ligne :

- Optique, J.-P. Parisot, P. Segonds, S. Le Boiteux, Éd. Dunod
- Optique - Fondements et applications, J.-P. Pérez, Éd. Masson
- <http://uel.unisciel.fr/physique/optigeo/optigeo/co/optigeo.html>
- [https://media4.obspm.fr/public/ressources\\_lu/pages\\_optique-geometrique](https://media4.obspm.fr/public/ressources_lu/pages_optique-geometrique)
- ...

# I - Introduction

## I.1 Bref historique (1)



- Dès l'antiquité, la notion de rayon lumineux et la loi de la réflexion sont connues : Euclide (autour de -300), Héron l'Ancien (Ier siècle), Ptolémée (≈100–168)... *École d'Alexandrie*.



- Réfraction :
  - . Ibn Sahl : 1ère mention de la loi de la réfraction, vers 983 – 984.
  - . Alhazen (Ibn al-Haytham) : «*Traité d'Optique*» (1015–1021), définition précise des lois de la réflexion, tentative pour la réfraction (mais sans reprendre les résultats de Ibn Sahl)...
  - . Robert Grossetête et Roger Bacon en parlent aussi au XIII<sup>e</sup> siècle.
  - . Thomas Harriot : premières tables via la loi des sinus en 1601.
  - . Snell publie ça «*proprement* » en 1621.
  - . Puis Descartes en 1637, dans son «*Dioptrique* ».



# I - Introduction

## I.1 Bref historique (2)



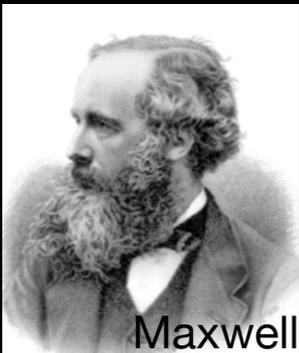
Galilée

- Les premiers instruments optiques apparaissent au XVII<sup>e</sup> siècle (microscope de Hans et Jansen — 1600, lunette de Galilée — 1609, télescope de Newton — 1671).



Fermat

- Développement, en parallèle de l'optique géométrique, de la description corpusculaire de la lumière : les sources lumineuses émettent des particules de lumière réfléchies par les miroirs et qui traversent les milieux transparents à des vitesses différentes => principe de moindre temps (Fermat : « La nature agit toujours par les voies les plus courtes »).



Maxwell

- Les lois « de Snell-Descartes » (ou « de Snell ») peuvent être entièrement déduites du principe de Fermat, et en physique moderne des équations de Maxwell (électromagnétisme).

# I - Introduction

## I.1 Bref historique (3)

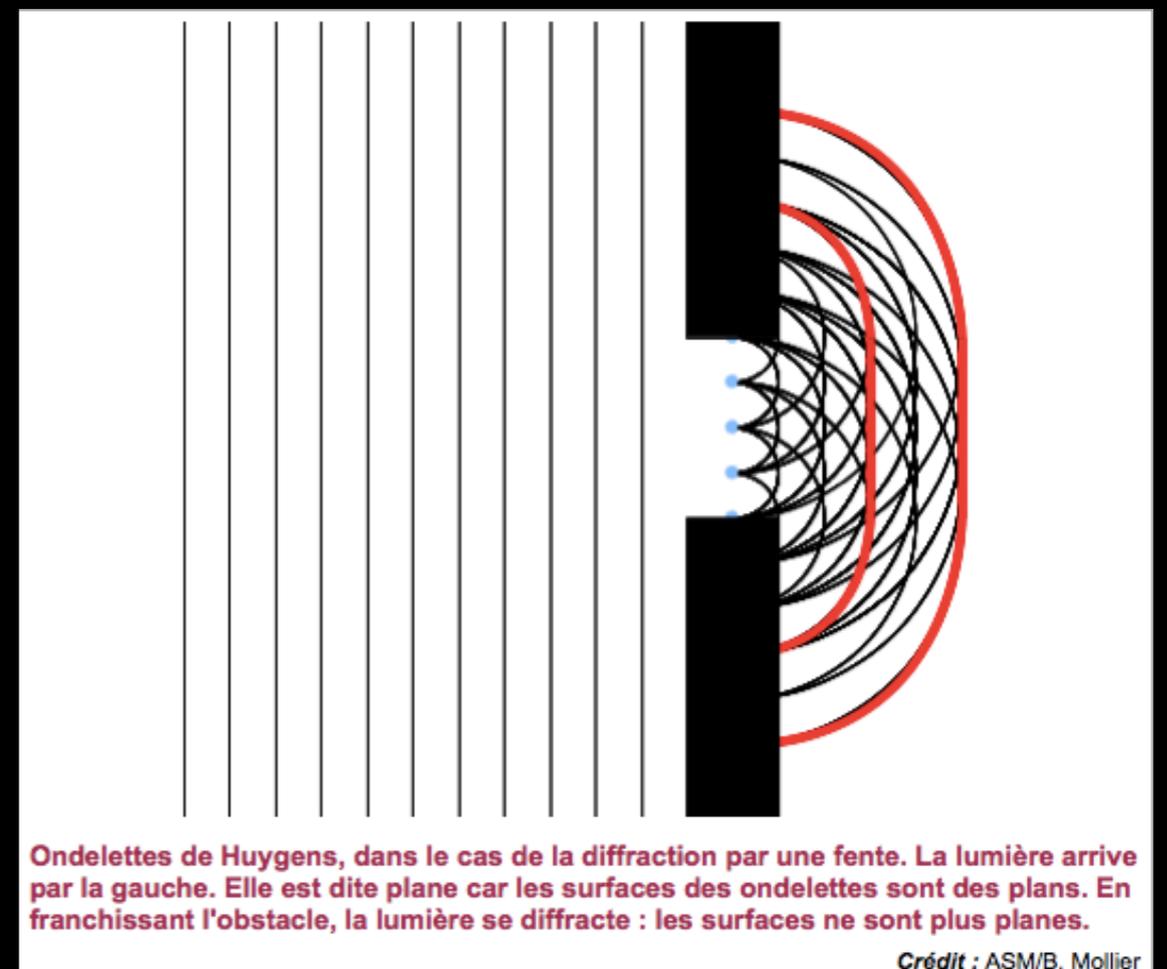
- Dans le même temps : Newton décompose la lumière => lumière blanche = superposition de lumières colorées. Et Huyghens développe une théorie ondulatoire de la lumière (1678).



Newton



Huyghens

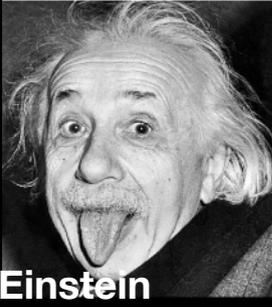


# I - Introduction

## I.1 Bref historique (4)

- 
- Au XIX<sup>e</sup> siècle, Thomas Young reprend le modèle des ondelettes de Huyghens pour décrire le phénomène d'interférence, et Augustin Fresnel pour établir la théorie de la diffraction, puis Maxwell pour celle de l'électromagnétisme.

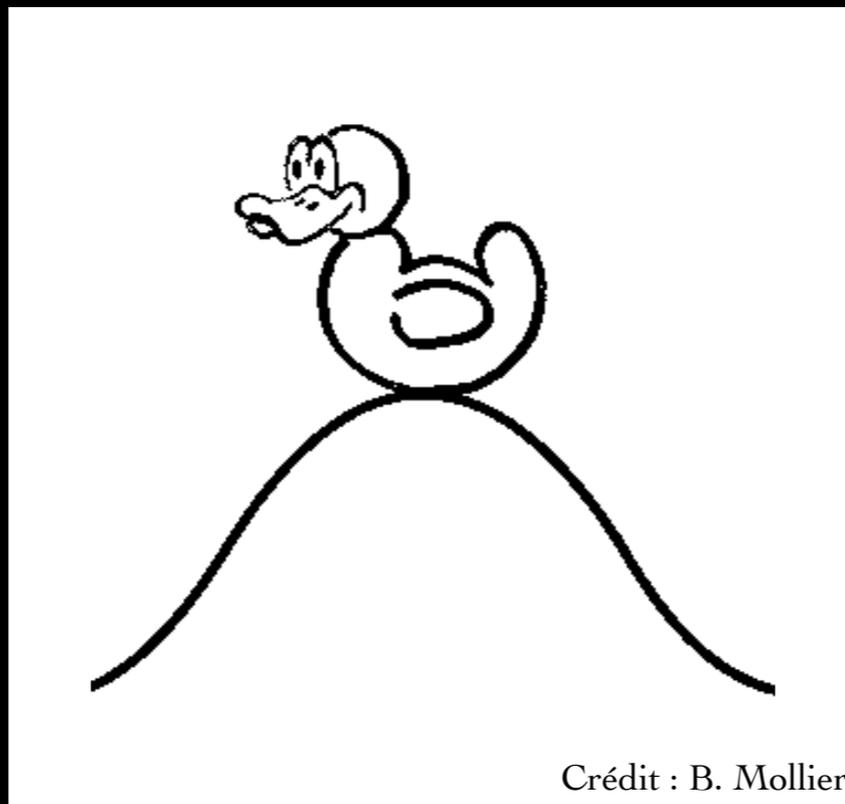
=> la lumière est une onde électromagnétique, de fréquence  $\nu \simeq 10^{14} \text{ Hz}$  pour sa partie visible, et de vitesse  $c \simeq 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ .

- 
- Au XX<sup>e</sup> siècle, Albert Einstein remet au goût du jour la théorie corpusculaire (1905) => notion de photon (= grain de lumière), d'énergie  $E = h \nu$ , avec  $h$  la constante de Planck :  $h = 6.62 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$
- 
- En 1924, Louis de Broglie concilie les deux approches => dualité onde-corpuscule.

# I - Introduction

## I.2 Notions de base sur la lumière (1)

- Onde : phénomène de propagation ordonnée d'énergie, sans transport de matière...

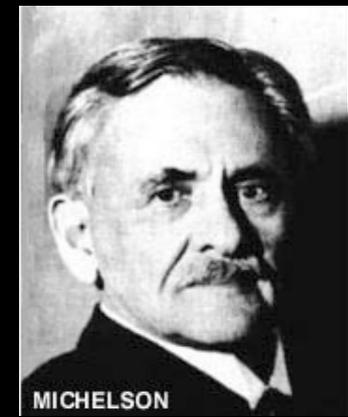


Crédit : B. Mollier

(Il y a transfert d'énergie : le canard oscille, mais pas de matière : le canard n'avance pas !)

# I - Introduction

## I.2 Notions de base sur la lumière (2)



- Contrairement aux ondes sonores, les ondes électromagnétiques se propagent sans besoin de support - sinon on ne verrait pas les étoiles !  
=> *L'éther* n'existe pas : la lumière se déplace à la même vitesse dans toutes les directions (expérience de Michelson et Morley).  
=> Les ondes sonores ne se propagent pas dans le vide (~~Star Wars~~).

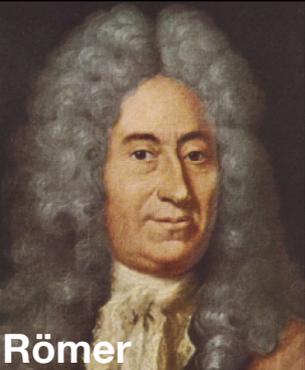


- Vitesse de la lumière =  $c$ , avec :  $c = 299792458 \text{ m/s} \simeq 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ .  
(soit environ 8 tours de la Terre en une seconde !)

# I - Introduction

## I.2 Notions de base sur la lumière (3)

- Un calcul simple de la vitesse de la lumière inspiré de l'expérience de Olaüs Römer (1676)



Römer

234  
ne seconde de temps.

JOURNAL

Soit A le  
le premier  
dans l'ombre  
fortir en D,  
la Terre pl  
stances de J  
Or suppo  
en L vers l  
Eture de Jupi  
mier Satellit  
merfion ou  
en D; &  
ron 42. he

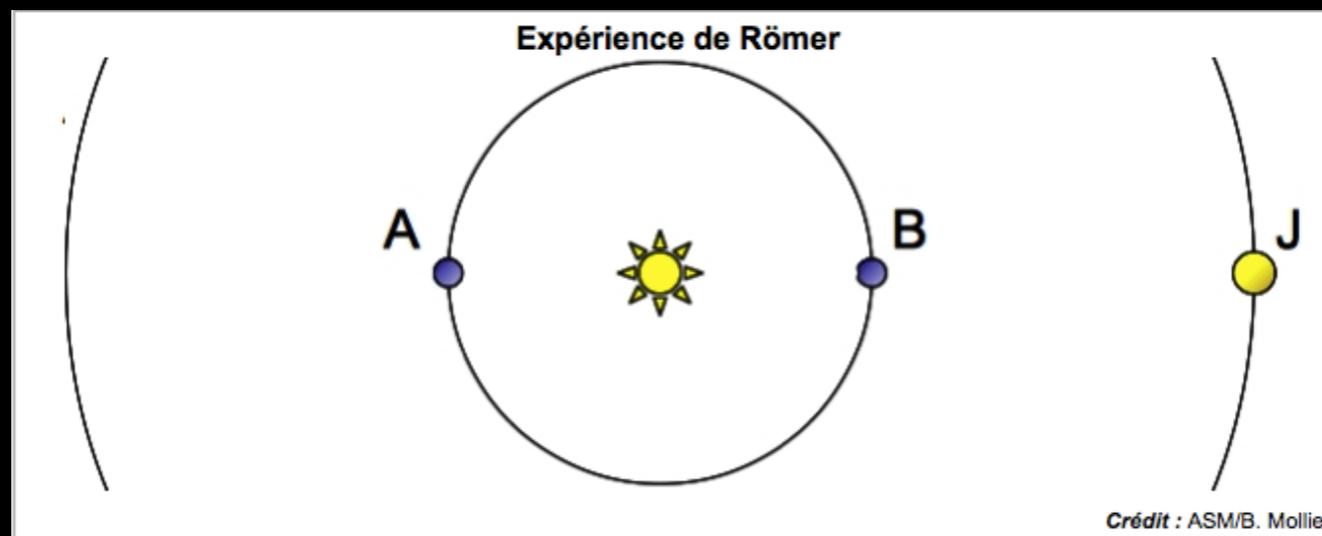
« Soit A le Soleil, B Jupiter, C le premier satellite qui entre dans l'ombre de Jupiter pour en sortir en D, et soit E, F, G, H, K, L, la Terre placée à diverses distances de Jupiter.  
Or supposé que la Terre étant en L vers la seconde quadrature de Jupiter, ait vu le premier satellite, lors de son émerfion ou sortie de l'ombre en D; et qu'ensuite, environ 42 heures et demie après, savoir après une révolution de ce satellite, la Terre se trouvant en K, le voit de retour en D: il est manifeste que si la lumière demande du temps pour traverser l'intervalle LK, le satellite sera vu plus tard de retour en D, qu'il n'aurait été si la Terre était demeurée en L; de sorte que la révolution de ce satellite, ainsi observé par les émerfions, sera retardée d'autant de temps que la lumière en aura employé à passer de L en K, et qu'au contraire dans l'autre quadrature FG, où la Terre en s'approchant, va au devant de la lumière, les révolutions des immersions paraîtront autant raccourcies, que celles des émerfions avaient parues allongées. »

Extrait du rapport de Römer, dans le *Journal des sçavans* du Lundy 7 Décembre 1676 (page 234).

# I - Introduction

## I.2 Notions de base sur la lumière (4)

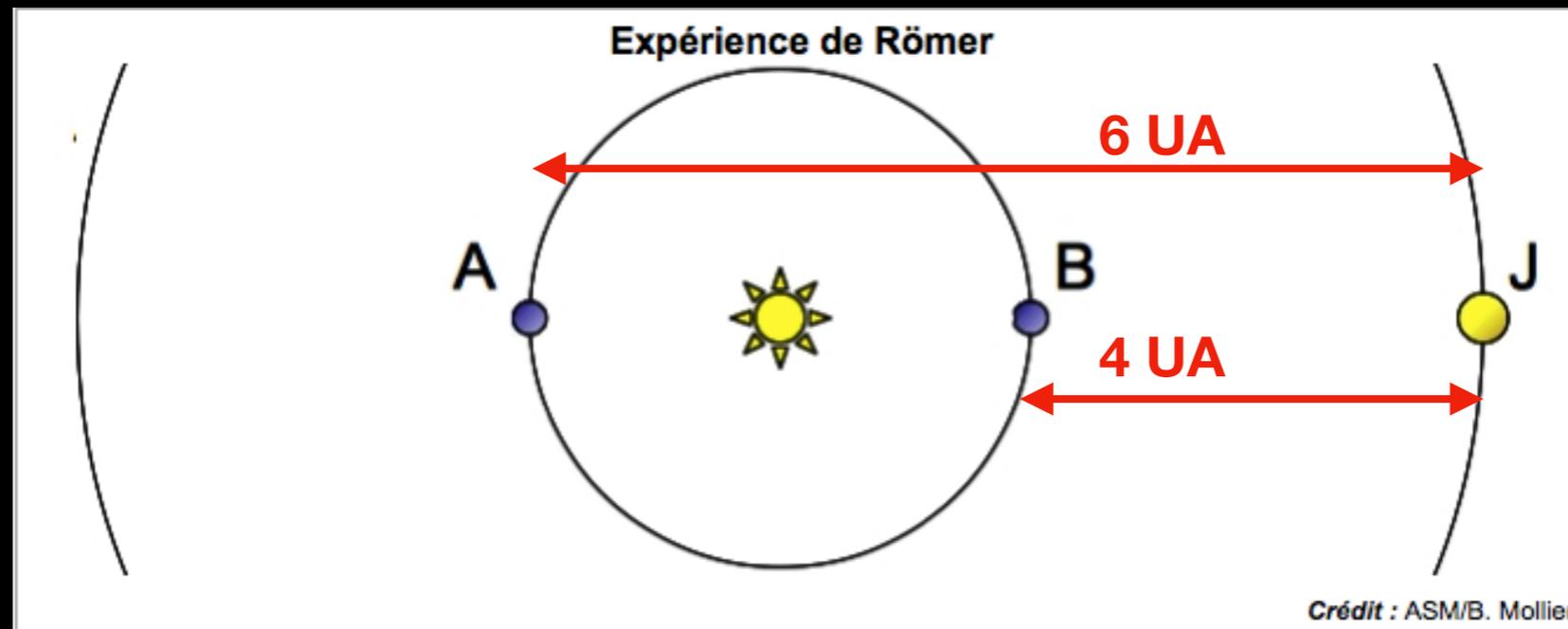
- Un calcul simple de la vitesse de la lumière inspiré de l'expérience de Olaüs Römer (suite #1)
- Entre les deux configurations du schéma (Terre en A vs. Terre en B), il existe un décalage de pratiquement  $10^3$  secondes (996 pour l'exactitude) dans les prédictions de l'éclipse du satellite Io de Jupiter (distance Soleil—Terre = 1 UA  $\approx$  150  $10^6$  km (moins bien connue à l'époque), distance Soleil—Jupiter = 5 UA, UA = unité astronomique).



# I - Introduction

## I.2 Notions de base sur la lumière (5)

- Un calcul simple de la vitesse de la lumière inspiré de l'expérience de Olaüs Römer (suite #2)



- $6 - 4 = 2$  UA, qui correspondent aux 996 secondes de décalage A-B  
 $\Rightarrow c = 2 \text{ UA} / 996 \text{ s} \approx 2 \times 150 \cdot 10^6 \text{ km} / 1000 \text{ s} \approx 300 \cdot 10^9 \text{ m} / 10^3 \text{ s}$   
 $\Rightarrow c \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

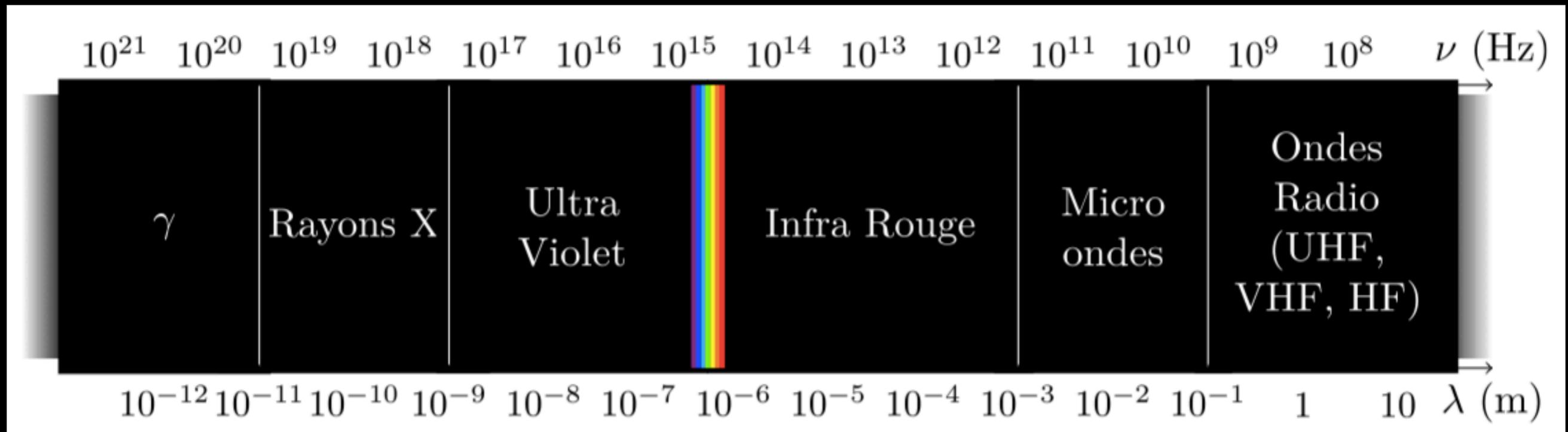
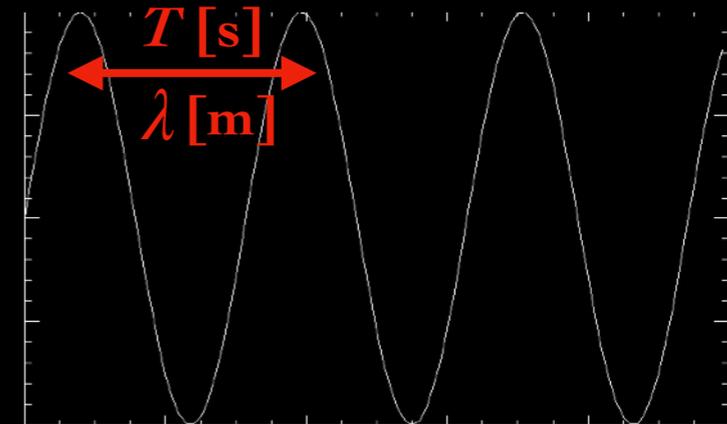
# I - Introduction

## I.2 Notions de base sur la lumière (6)

- Domaines de fréquence lumineuse

$$\lambda = c T$$

longueur d'onde                      période = 1/fréquence



# I - Introduction

## I.2 Notions de base sur la lumière (7)

- Propagation dans un milieu :

Quand la lumière se propage dans un milieu, elle interagit avec celui-ci (air, eau, verre, etc.) => propriétés de la lumière modifiées (vitesse).

Dans certains milieux (le verre par ex.), la vitesse de propagation apparaît plus importante pour le rouge que pour le bleu : il y a dispersion (prismes), l'intensité lumineuse peut décroître (lunettes de soleil, phénomène d'absorption) [\*].

Dans la suite : MHTI (milieux homogènes, transparents, isotropes).

[\*] : ou même croître (lasers, phénomène d'amplification)...

# I - Introduction

## I.2 Notions de base sur la lumière (8)

### - MHTI:

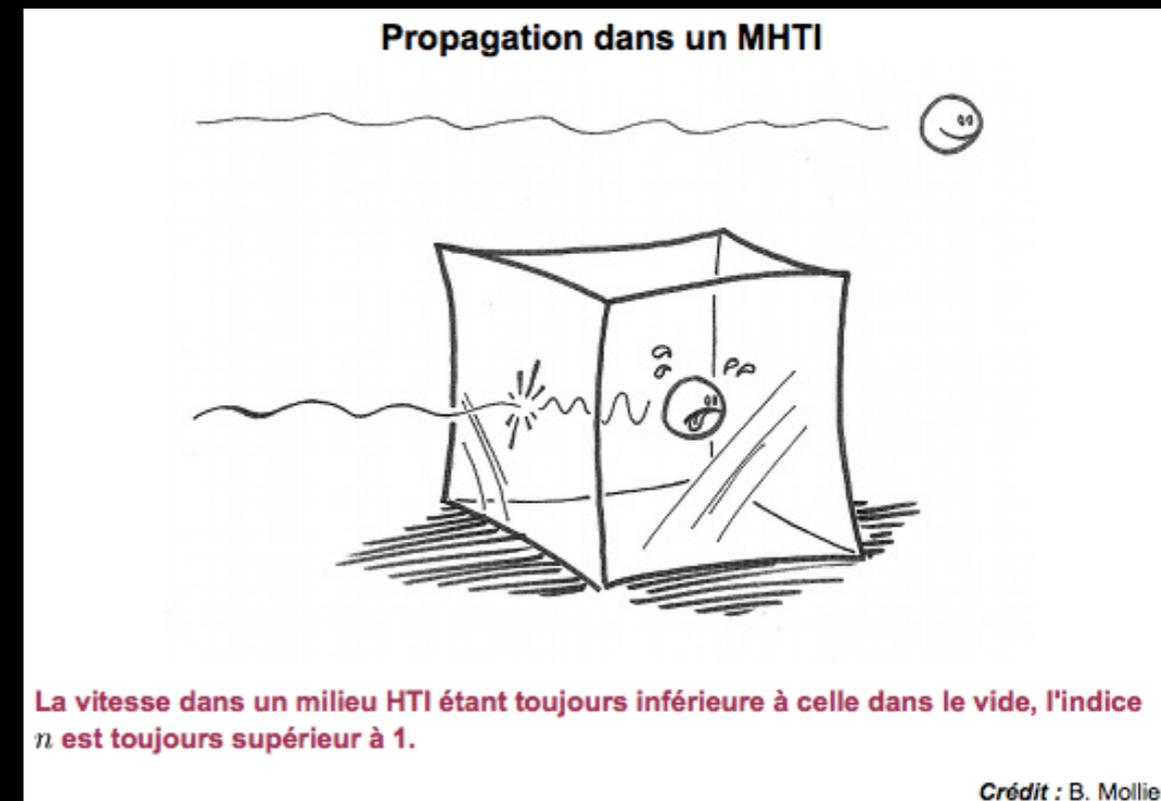
- . Transparent : milieu non-absorbant.
- . Homogène : propriétés du milieu les mêmes en tout point.
- . Isotropes : propriétés du milieu les mêmes dans toutes les directions.

### - Indice optique d'un MHTI :

$n = c / v$ , et comme  $v \leq c$ , on a :  $n \geq 1$ .

<i>milieu</i>	<i>indice</i>
vide	1
air	$1.00029 \approx 1$
eau	$1.3325 \approx 1.33$
verre	$\approx 1.5$

↓  
réfringence  
augmente



# I - Introduction

## I.3 Approximation de l'optique géométrique

- Expérience du laser pointeur

=> la lumière se propage de manière rectiligne, du moins dans un MHTI — avec  $n$  constant ! (Attention : pas le cas pour un mirage !)

- C'est une loi limite : elle n'est plus vérifiée si l'on diffracte le faisceau du laser avec un trou microscopique (d'une taille  $\approx$  longueur d'onde).

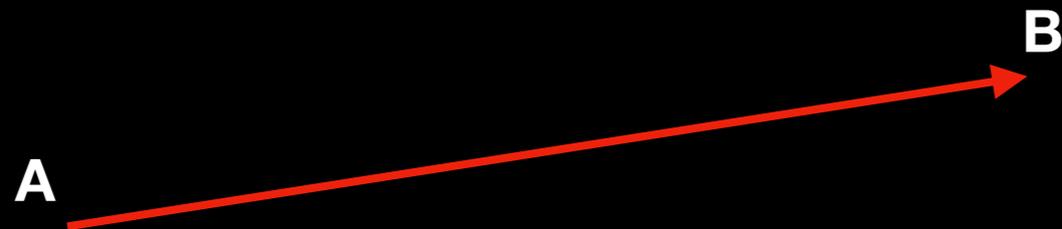
=> Cadre de l'optique géométrique, valable tant que les longueurs d'onde en jeu sont faibles devant les dimensions caractéristiques du système optique en question (comme la Mécanique Newtonienne qui fonctionne bien tant que  $v \ll c$ ).

Sinon on doit considérer l'Optique Ondulatoire, et, pour des dimensions encore plus petites, l'Optique Quantique.

# I - Introduction

## I.4 Rayon, Fermat, retour inverse (1)

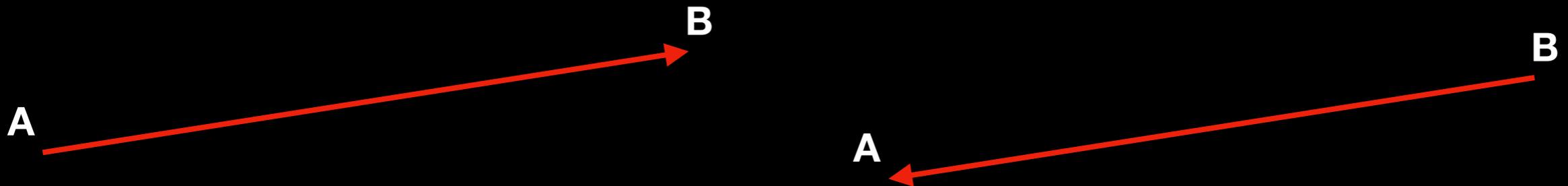
- La lumière se propage donc en ligne droite comme le ferait un ensemble de particules (les photons). Les trajectoires de ces particules constituent les rayons lumineux.
- La notion de rayon lumineux est illustrée par un pinceau lumineux cylindrique obtenu avec un petit diaphragme (mais avec  $r \gg \lambda$ ).
- Dans un MHTI, le chemin effectivement parcouru par la lumière est celui qui rend le temps de parcours minimal : la ligne droite. Ceci découle du principe de Fermat.



# I - Introduction

## I.4 Rayon, Fermat, retour inverse (2)

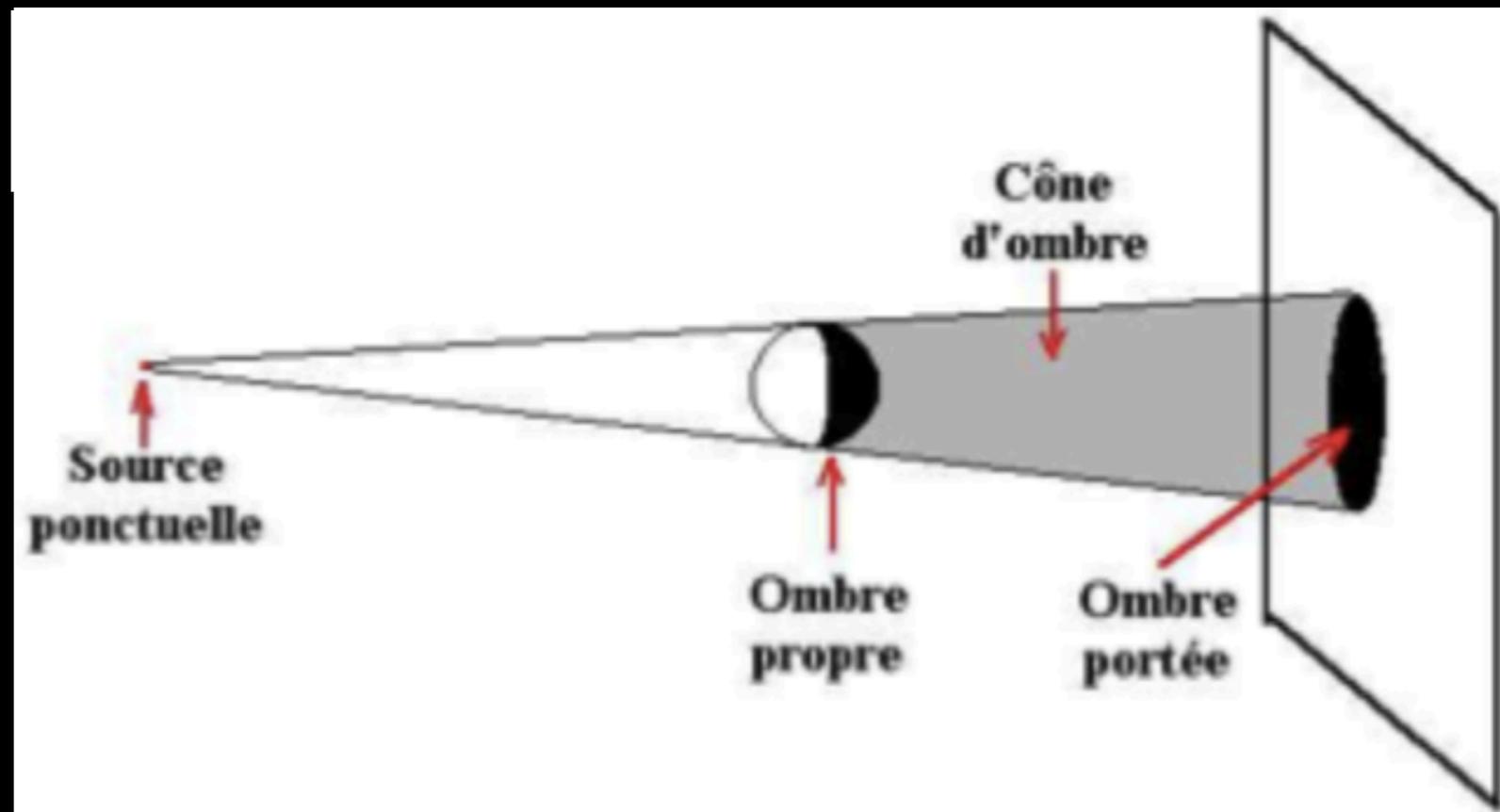
- Il en résulte que, pour aller d'un point B à un point A, la lumière reprendra exactement le même chemin que celui emprunté pour aller de A à B. Il s'agit du principe de retour inverse de la lumière.



# I - Introduction

## I.5 Ombre, sténopé, Thalès (1)

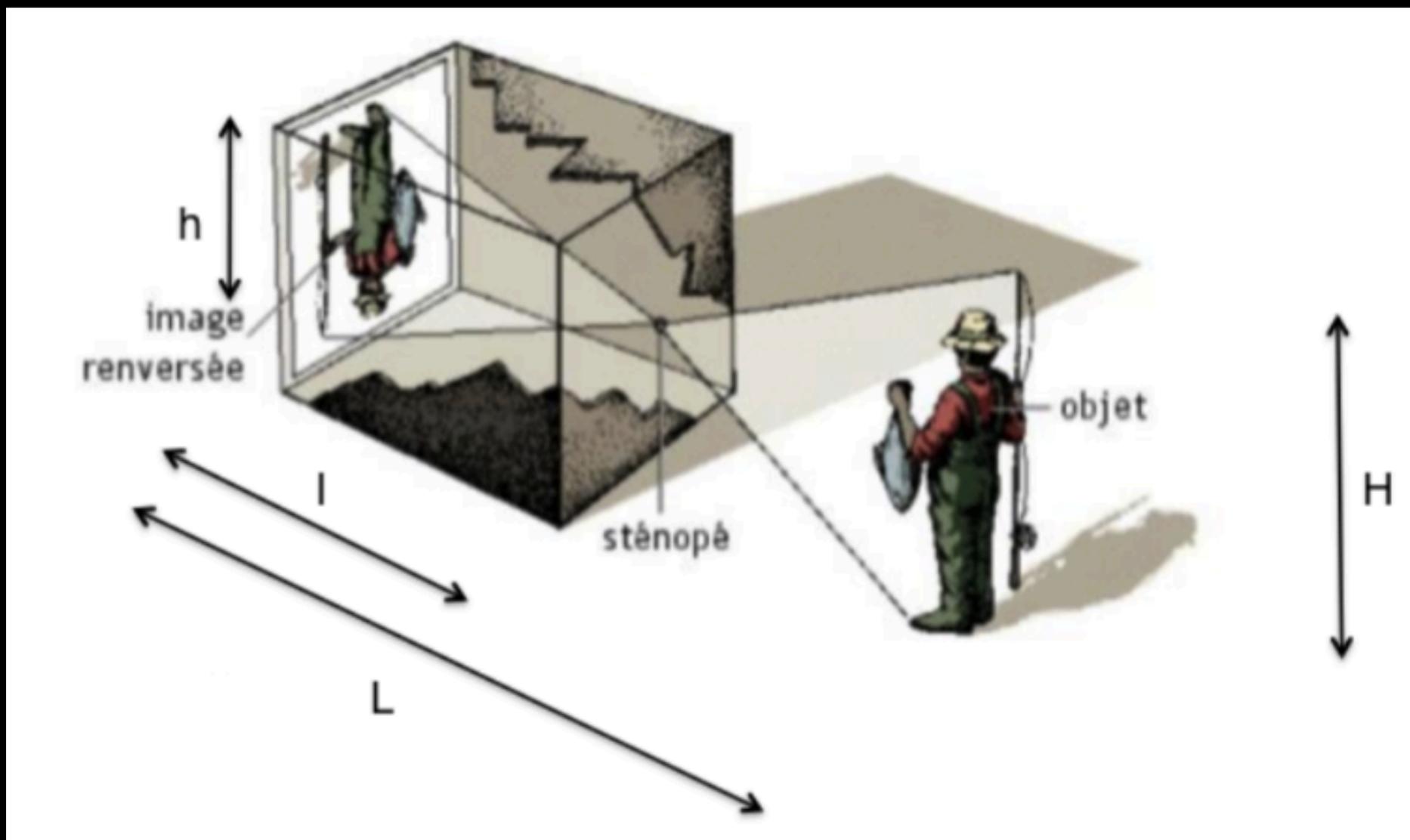
- Il résulte de ce qui précède l'existence d'ombres (+notion de source)



# I - Introduction

## I.5 Ombre, sténopé, Thalès (2)

- Un système optique simple : le sténopé (+notions d'objet et d'image)

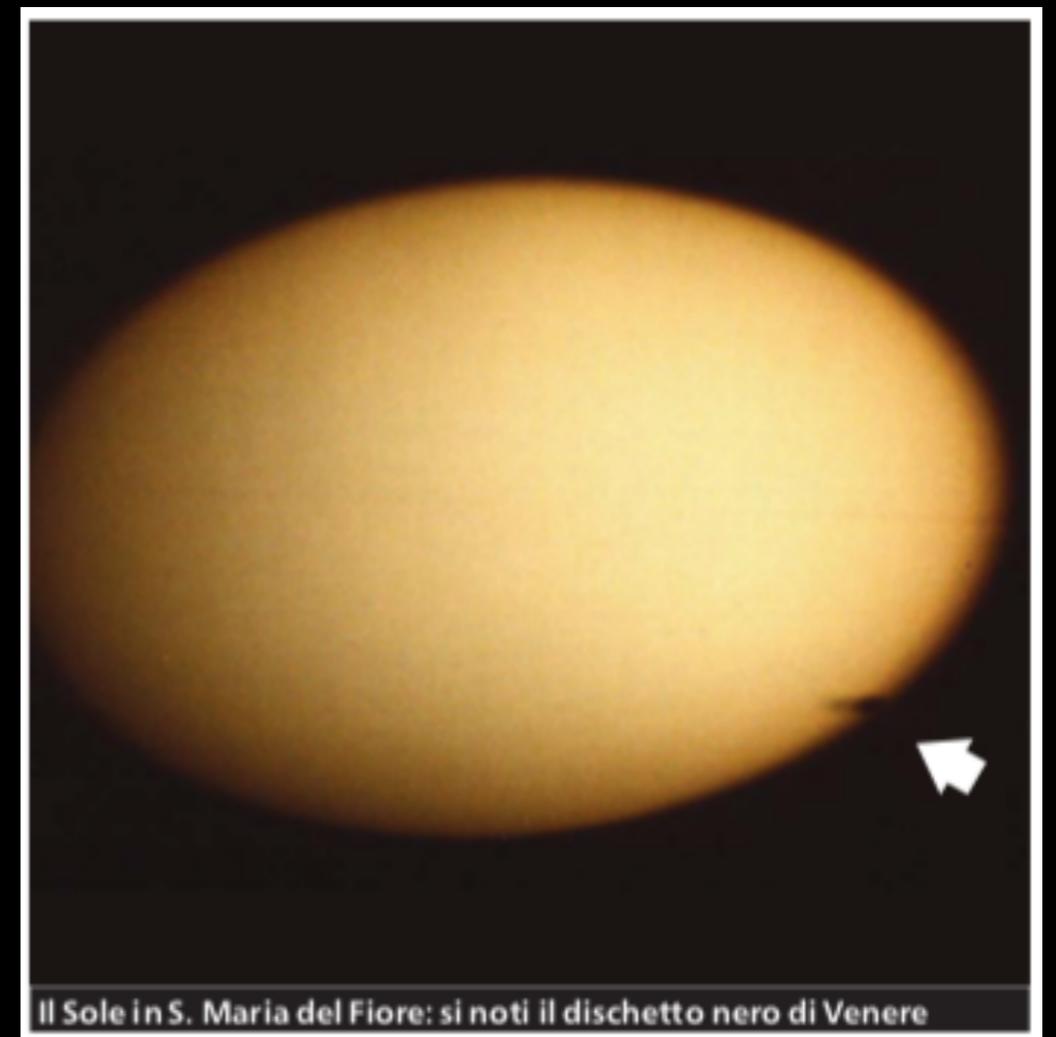


Mozi (IV<sup>e</sup> avant JC)

# I - Introduction

## I.5 Ombre, sténopé, Thalès (3)

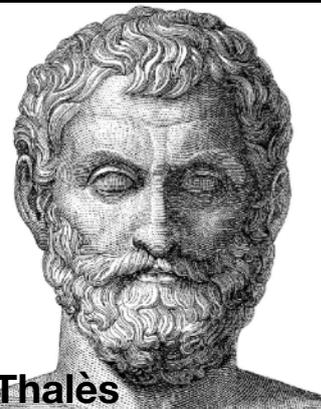
- Illustration du sténopé : image du Soleil sur le sol du dôme de Santa Maria del Fiore à Florence, autour du solstice d'été, ici pendant le transit de Vénus en juin 2004...



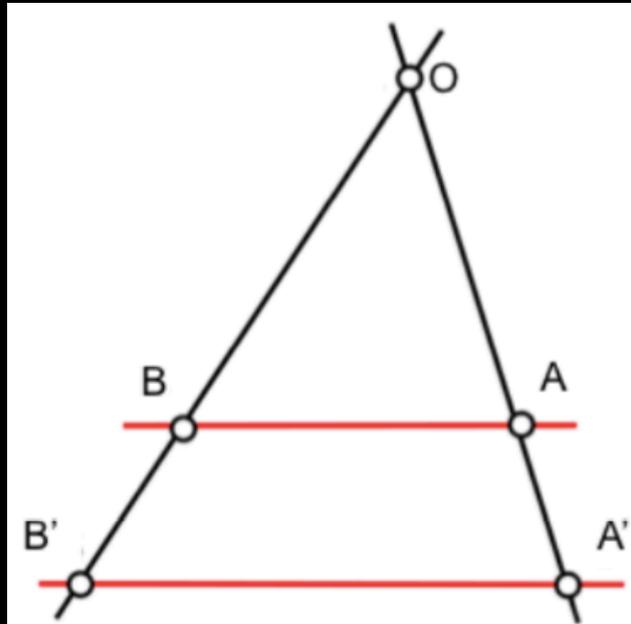
Il Sole in S. Maria del Fiore: si noti il dischetto nero di Venere

# I - Introduction

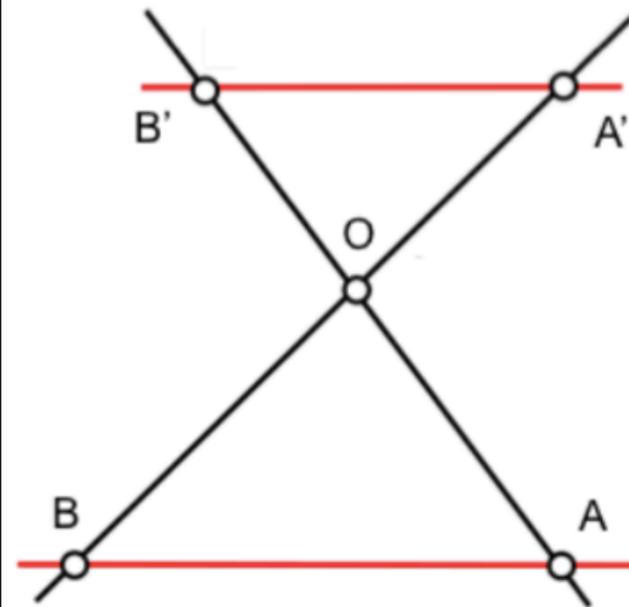
## I.5 Ombre, sténopé, Thalès (4)



- Il est utile à ce propos de rappeler le théorème de Thalès...



$$\frac{OA}{OA'} = \frac{OB}{OB'} = \frac{AB}{A'B'}$$

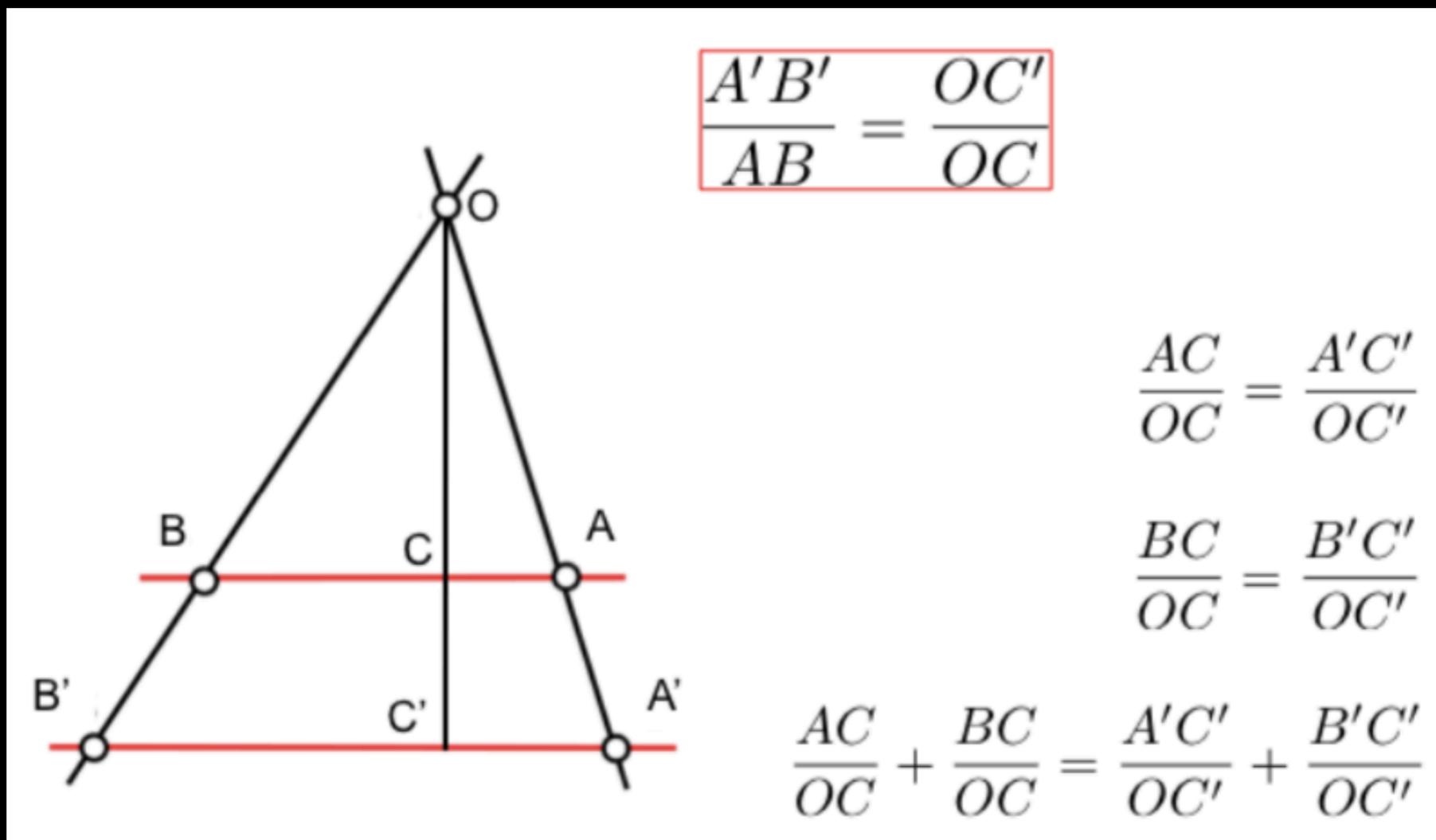


$$\frac{OA}{OB'} = \frac{OB}{OA'} = \frac{AB}{A'B'}$$

# I - Introduction

## I.5 Ombre, sténopé, Thalès (5)

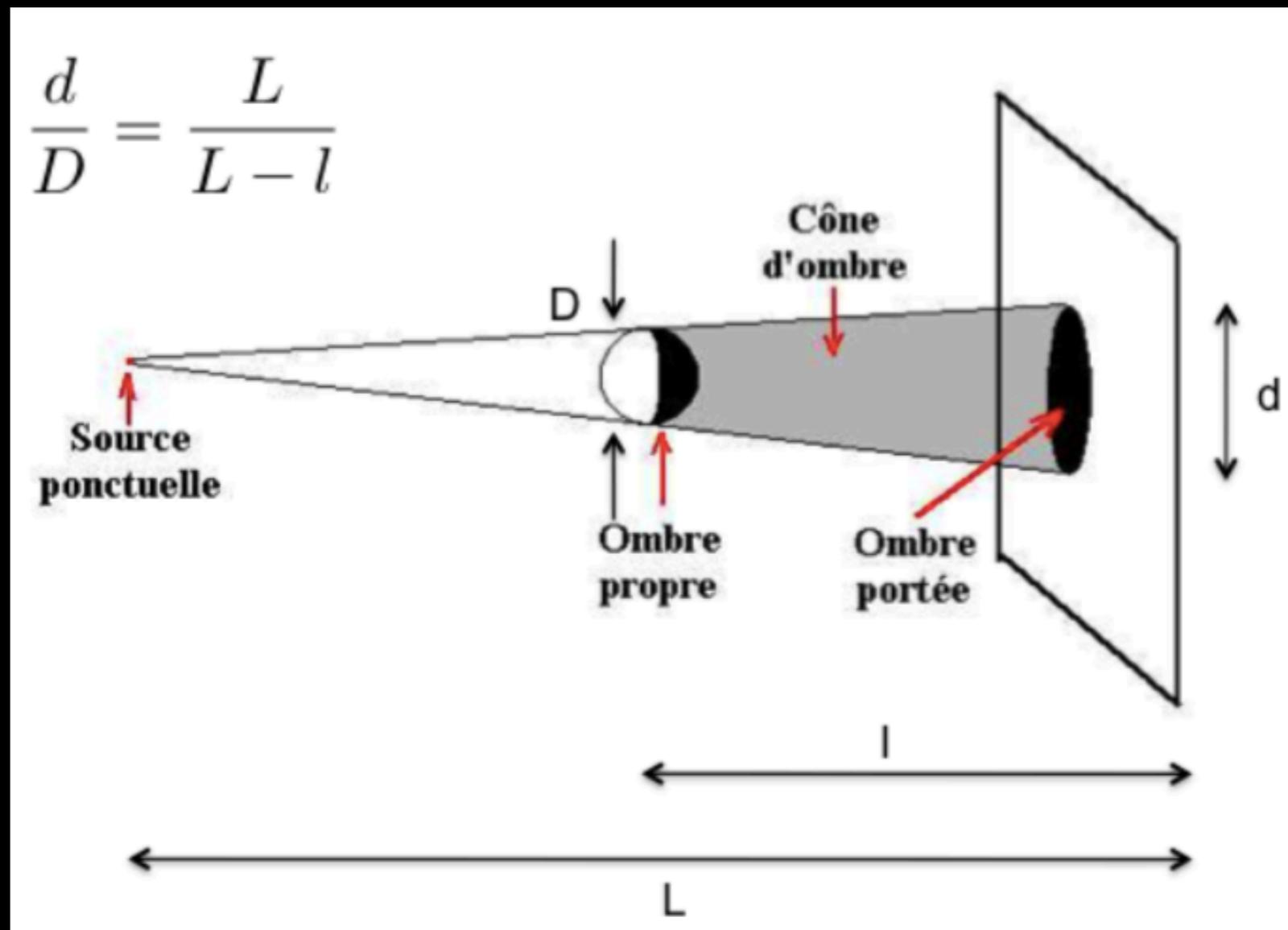
- Mais aussi :



# I - Introduction

## I.5 Ombre, sténopé, Thalès (6)

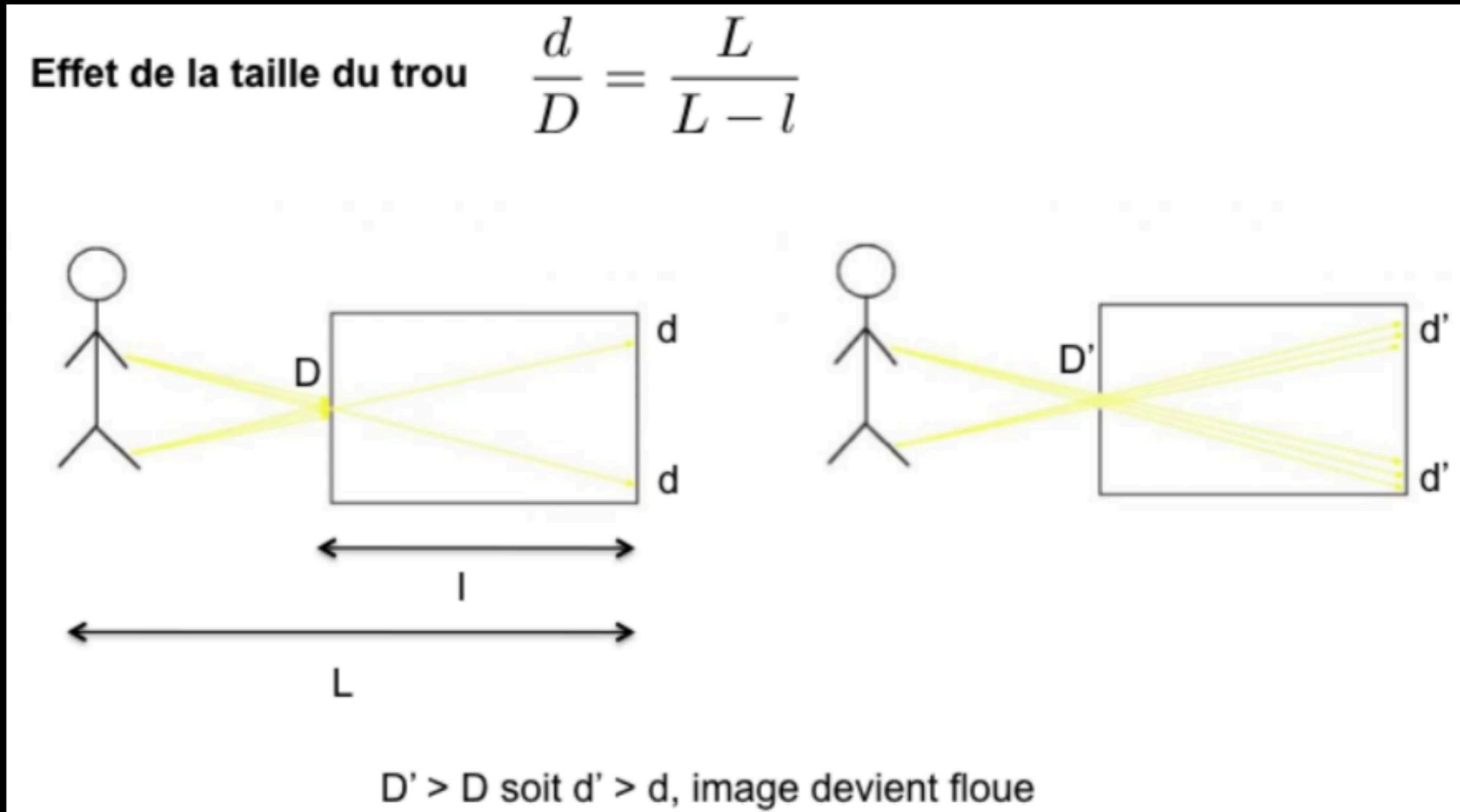
- Si on utilise Thalès dans le cas de l'ombre portée, on peut déduire que :



# I - Introduction

## I.5 Ombre, sténopé, Thalès (7)

- Et concernant la taille du trou du sténopé (+notion de stigmatisme)...



# I - Introduction

## I.6 Analyse dimensionnelle (1)

- On est en présence en optique géométrique de simplement deux grandeurs physiques fondamentales : la longueur et le temps.
- Dimension d'une longueur = [longueur] =  $L$
- Dimension d'un temps = [temps] =  $T$
- La dimension d'une grandeur physique s'exprime toujours en fonction des dimensions des grandeurs fondamentales (ici  $L$  et  $T$ ).
- La dimension d'une vitesse  $v$ , notée  $[v]$ , s'exprime ainsi

$$[v] = [\text{longueur}]/[\text{temps}] = \frac{L}{T} = LT^{-1}$$

# I - Introduction

## I.6 Analyse dimensionnelle (2)

- Pour un angle on a  $[\text{angle}] = 1$ , on dit que la grandeur « angle » n'a pas de dimension => elle est « a-dimensionnelle ».
- Exemple 1 - vitesse de la lumière dans un milieu d'indice  $n$  :  $v = c/n$   
=>  $n = c/v$  =>  $[n] = [c/v] = [c]/[v]$   
or :  $[v] = [c] = L/T$   
donc :  $[n] = 1$   
=> l'indice de réfraction est une grandeur elle aussi a-dimensionnelle.
- Exemple 2 - loi de Snell-Descartes pour la réfraction :

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

où l'on a, donc :  $[n_1] = [n_2] = 1$ , mais aussi :  $[i_1] = [i_2] = 1$

# I - Introduction

## I.6 Analyse dimensionnelle (3)

- Attention : ne pas confondre ces DIMENSIONS ( $L, T$ ) avec les UNITÉS correspondantes (mètre, seconde) !
- L'analyse dimensionnelle permet de vérifier qu'une expression est correcte vis-à-vis des grandeurs mises en jeu, en particulier que les deux membres d'une égalité sont bien HOMOGÈNES.
- Elle peut même permettre d'établir ex novo une expression littérale, mais toujours à une constante a-dimensionnelle (= sans dimension = de dimension 1) près !

# II - Réflexion & miroir plan

## II.1 Introduction

- Miroir plan : surface plane, polie et réfléchissante.
  - . Antiquité : métal poli (bronze, *Ag*, *Au*)
  - . XVème siècle : verre + amalgame d'étain
  - . ensuite : couche d'*Ag*
  - . aujourd'hui : vaporisation d'une couche métallique (*Ag*, *Al*, *Cr*, *Au*) ou diélectrique sur des surfaces polies.



- Pouvoir réflecteur pour une réflexion vitreuse sous incidence normale (avec :  $n$  = indice du milieu considéré) :

$$R = \left( \frac{n - 1}{n + 1} \right)^2$$

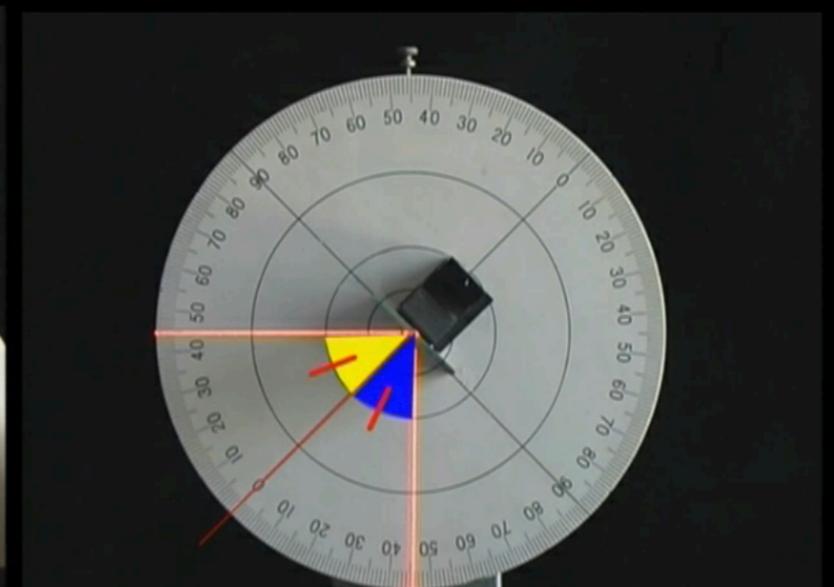
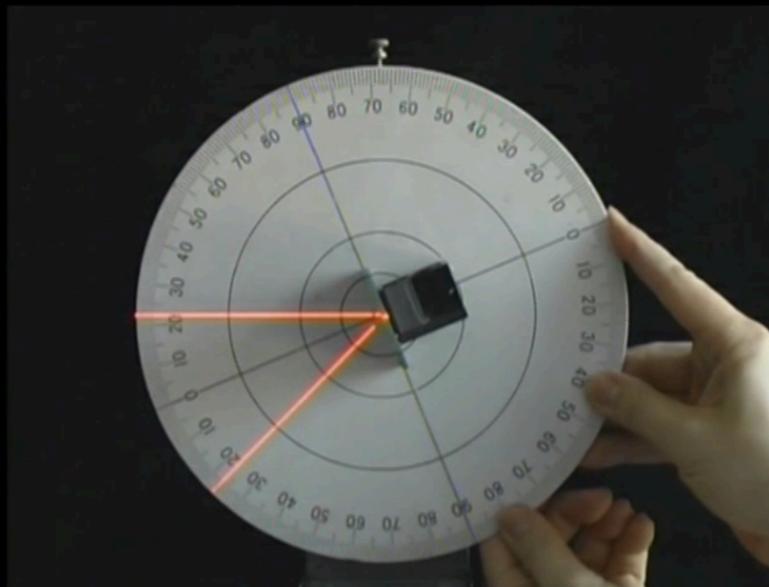
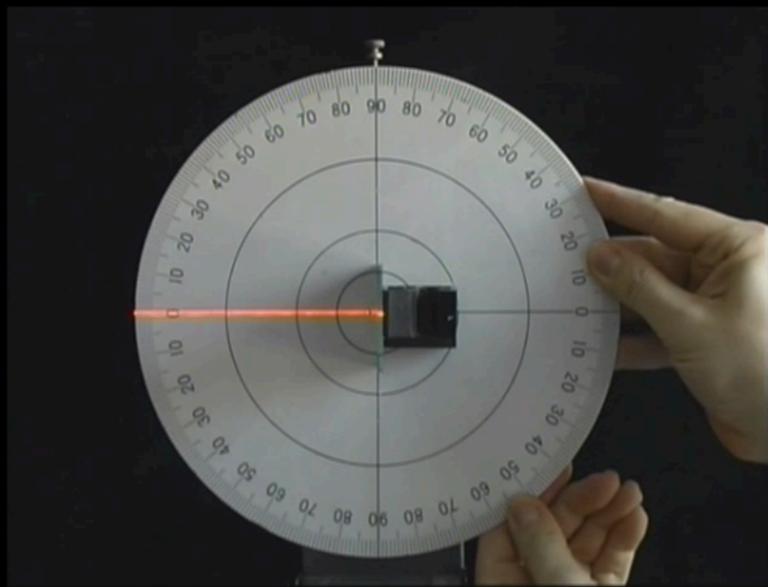
$n$	$R$
$\approx 1$ (air)	$\approx 0$
$\approx 1.33$ (eau)	$\approx 0.02$
$\approx 1.5$ (verre)	$\approx 0.04$

Alors que pour un dépôt d'*Ag* :  $R=0.88$ , et pour un dépôt d'*Al* :  $R=0.9$ .

# II - Réflexion & miroir plan

## II.2 Loi de Snell-Descartes (1)

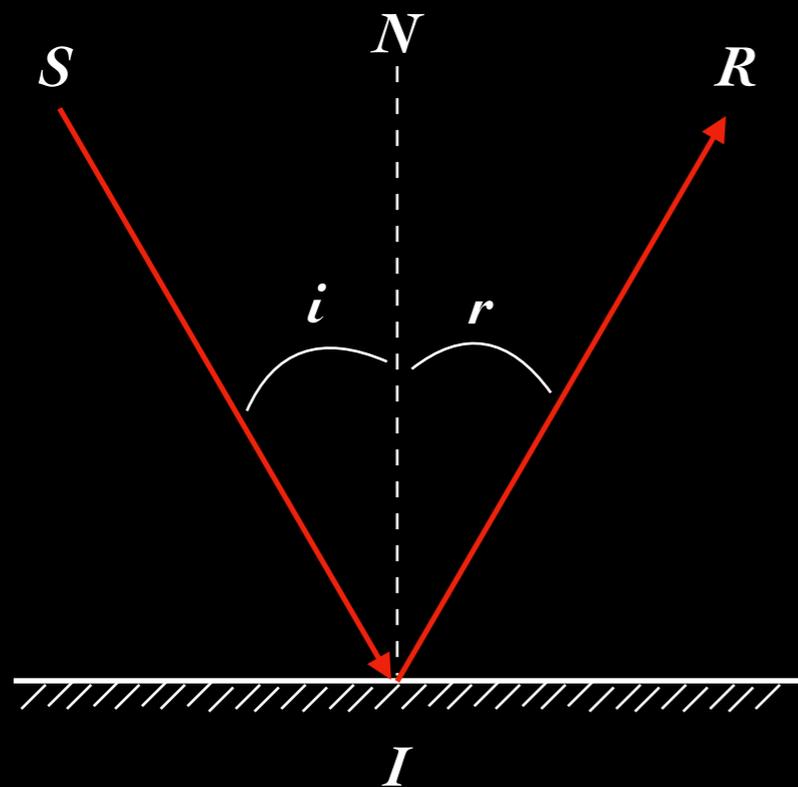
Buffering 26%



# II - Réflexion & miroir plan

## II.2 Loi de Snell-Descartes (2)

- Loi de la réflexion = première loi de Snell-Descartes



- $(IR)$  est dans le même plan que  $(SI)$

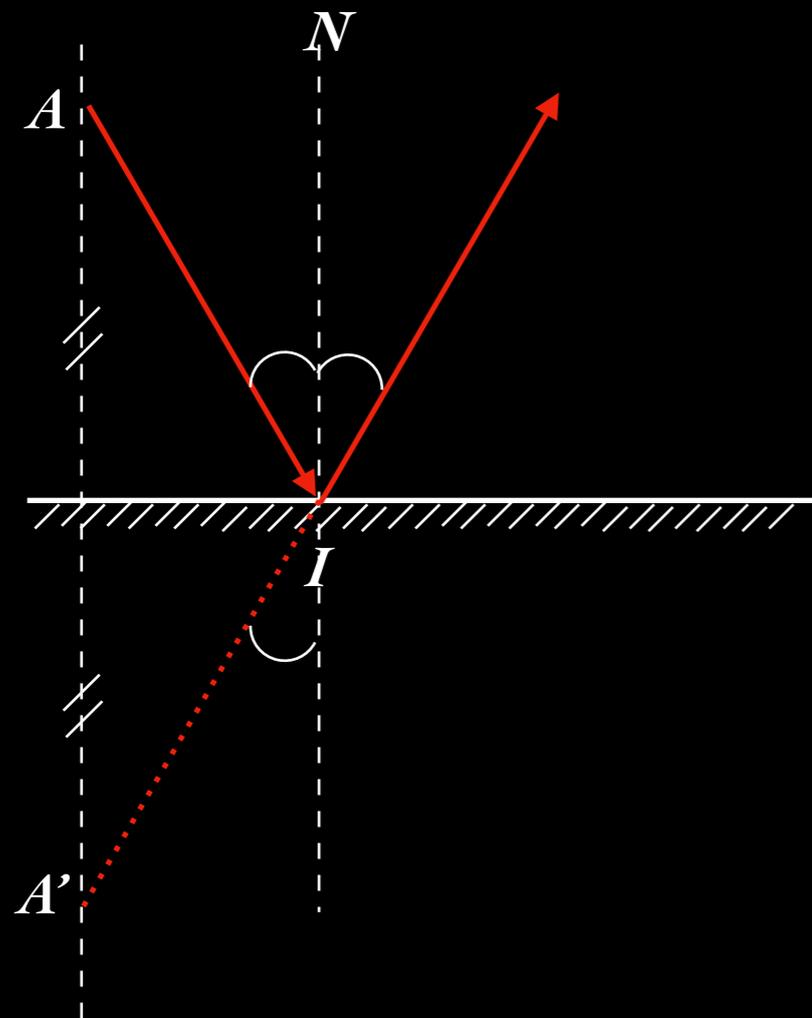
- $r = i$

- conforme au principe de Fermat et au principe de retour inverse de la lumière

# II - Réflexion & miroir plan

## II.3 Image (1)

- Image d'un point



. à tout rayon issu d'un point A, appelé point objet, correspond un rayon réfléchi symétrique par rapport au miroir.

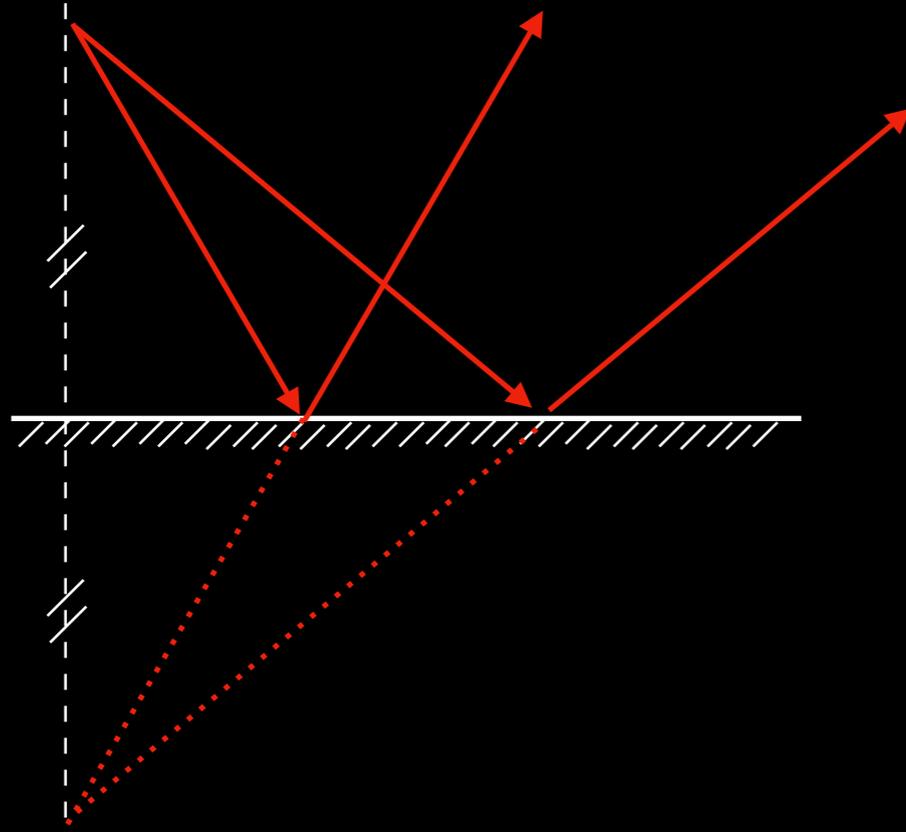
. objet = tout ensemble de points lumineux, que ce soit une source primaire (Soleil, étoile, lampe) ou secondaire (Lune, planète, objet, personne) qui diffuse toute ou partie de la lumière qu'elle reçoit de la source primaire.

# II - Réflexion & miroir plan

## II.3 Image (2)

- Image d'un point (suite)

$A$  = objet (ici réel)



$A'$  = image (ici virtuelle)

- . tous les rayons issus de  $A$  (et allant vers le miroir!) vont sembler provenir, après réflexion, du point  $A'$
- . image = ensemble des images des points d'un objet par un système optique, avec :
- . image d'un point = zone de convergence des rayons après traversée d'un système optique (image réelle), ou zone d'où les rayons semblent provenir (image virtuelle)
- .  $A'$  est l'image de l'objet  $A$ .

# II - Réflexion & miroir plan

## II.3 Image (3)

### - Stigmatisme

Un système optique est stigmatique si à un point objet correspond un point image unique.

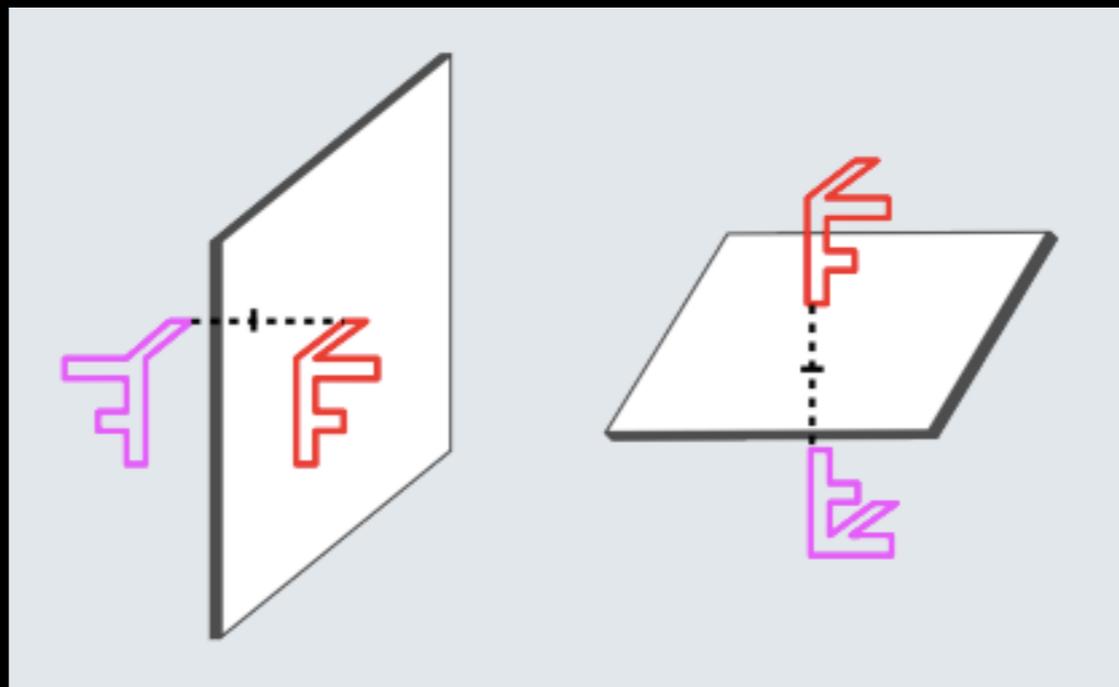
Le miroir plan est rigoureusement stigmatique pour tout point de l'espace : quelque soit  $A$ , son image est le symétrique  $A'$  de  $A$  dans le miroir.

(On verra par la suite que c'est une qualité rare !)

# II - Réflexion & miroir plan

## II.3 Image (4)

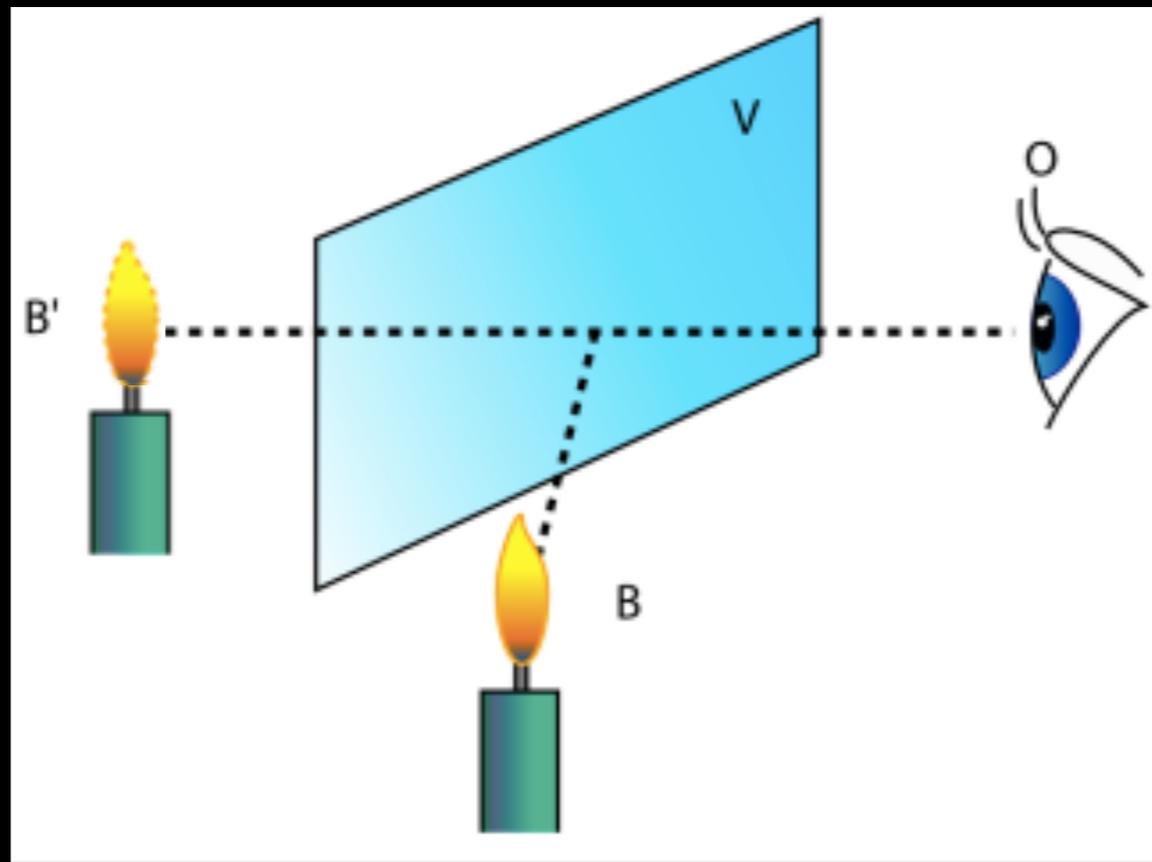
- Image d'un objet étendu : ensemble des points image correspondants aux différents points de l'objet.  
=> l'image est donc symétrique de l'objet par rapport au miroir.  
=> un trièdre objet à droite donne donc un trièdre image à gauche.



# II - Réflexion & miroir plan

## II.3 Image (5)

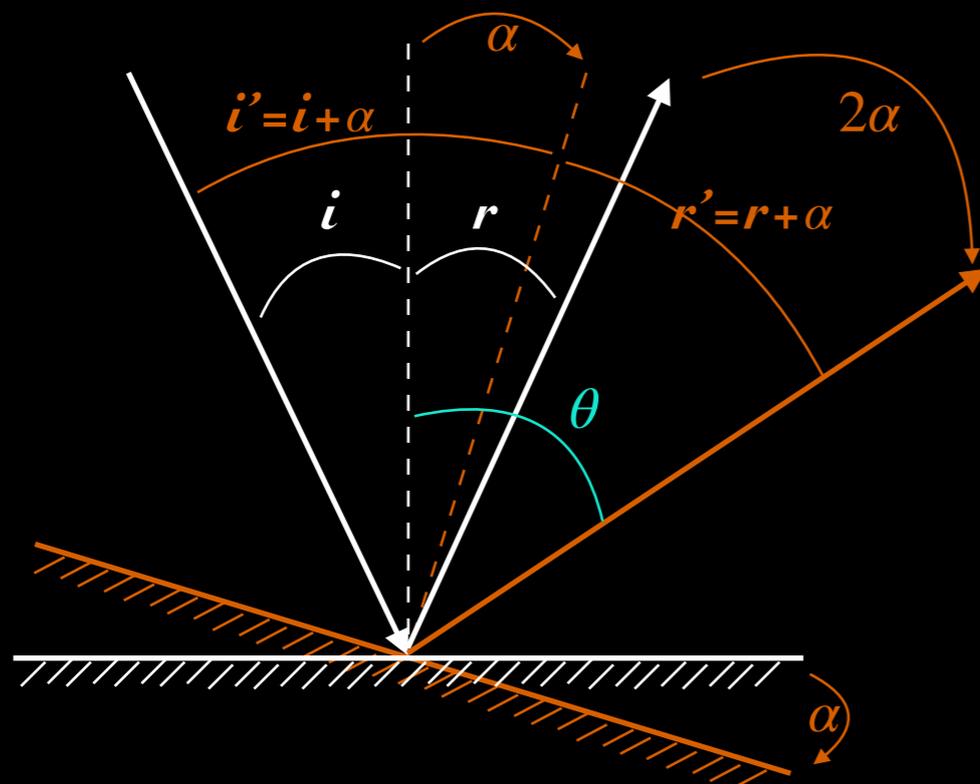
- Un peu de magie : l'expérience des deux bougies



# II - Réflexion & miroir plan

## II.4 Applications (1)

- Miroir tournant : miroir tourne de  $\alpha$  (autour d'un axe normal au plan d'incidence)  $\Rightarrow$  rayon réfléchi tourne de  $2\alpha$ .



En effet :

$$i' = i + \alpha \Rightarrow r' = i + \alpha = r + \alpha$$

$$\Rightarrow \theta = \alpha + r' = \alpha + r + \alpha = r + 2\alpha$$