

# La lumière a-t-elle une vitesse ?

*Deux mille ans de controverses, conséquences*

Pierre LAUGINIE

*GHDSO<sup>1</sup>, Université Paris-Sud, Faculté des sciences d'Orsay*

([pierre.lauginie@u-psud.fr](mailto:pierre.lauginie@u-psud.fr))

# Brève chronologie de la vitesse de la lumière

- ▶ de l'Antiquité grecque au début du XVII<sup>e</sup> siècle, deux mille ans de débats, culminant avec Descartes :  
*la lumière d'une étoile met-elle un temps pour venir à nous ?*
- ▶ fin XVII<sup>e</sup> et début XVIII<sup>e</sup> siècle : via l'Astronomie,  
*la lumière acquiert une vitesse*
- ▶ XIX<sup>e</sup> siècle : renversement de situation dû à la nouvelle possibilité de mesures *terrestres* :
  - ▶ *un nouvel outil pour les distances astronomiques*
- ▶ XX<sup>e</sup> siècle : Einstein et *l'invariance générale* de la vitesse de la lumière.

# Vitesse ou rapidité ?

Attention !

- ▶ au Moyen-Âge, le concept premier est celui de *rapidité* :
  - ▶ soit le *temps pour couvrir une distance donnée*
  - ▶ soit la *distance couverte en un temps donné* ;
- ▶ *pas d'anachronisme* : au Haut-Moyen-Âge, on ne divise pas une longueur par un temps !

*De l'Antiquité grecque à Descartes,  
un débat essentiellement abstrait ...*

# Antiquité grecque

- ▶ à l'exception d'Empédocle d'Agrigente (~490-435 BC), un dogme quasi-général : lumière et vision (en général non distingués) sont des phénomènes *instantanés* ;
- ▶ cependant, cette quasi-unanimité recouvre des points de vues très divers :
  - ▶ Aristote : la vision comme un *changement d'état global*, une actualisation du « diaphane » ; donc pas de vitesse, ce qui diffère d'une « vitesse infinie » ;
  - ▶ ou bien quelque chose voyage entre la source et l'œil :
    - ▶ soit à partir de de notre oeil : Euclide et le *rayon visuel* ;
    - ▶ soit à partir de la source : Lucrèce et les « simulacres » ;
    - ▶ soit les deux à la fois : Platon et la rencontre du « feu visuel » et du « feu externe » (Timée).
- ▶ noter que le concept de *rayon visuel* apporte un argument fort en faveur d'une propagation instantanée.

# Platon : *Le Timée*

[dans les corps lumineux, une]

sorte de feu qui n'a pas la capacité de brûler, mais celle de procurer une douce lumière<sup>3</sup>, ils ont su faire qu'elle devint chaque jour<sup>4</sup> un corps à nous approprié<sup>5</sup>.

En effet, le feu qui est au-dedans de nous et qui est frère de celui-là, dans sa toute pureté ils ont fait qu'il rayonne par les yeux;

Lors donc qu'il y a la lumière du jour tout autour du rayon visuel<sup>1</sup>, alors celui-ci s'épanche semblable vers son semblable<sup>2</sup> et se combine avec lui; un corps unique, approprié au nôtre, se constitue tout le long de la droite issue des yeux, en quelque direction que le feu jailli de l'intérieur aille buter contre celui qui arrive des objets extérieurs. Susceptible des mêmes impressions d'un bout à l'autre en raison de son homogénéité, quel que soit l'objet dont il prenne lui-même contact (*d*) ou qui vienne en contact avec lui, il en transmet les mouvements dans tout le corps jusqu'à l'âme, et lui procure cette sensation grâce à laquelle nous déclarons voir<sup>3</sup>. Mais, quand se retire dans la nuit son parent, le feu extérieur, il se trouve coupé d'avec lui; rencontrant, au sortir de l'œil, un milieu dissemblable, il est altéré lui-même et s'éteint; il ne peut plus confondre sa nature dans l'air environnant, puisque celui-ci ne contient pas de feu. Il cesse dans ces conditions de voir,

# Haut Moyen-âge arabe

**Ibn al-Haytham** (Al-Hazen, 965-1039) *renouvelle complètement* le point de vue sur la lumière :

- ▶ pour la première fois, lumière et vision considérés comme des phénomènes *distincts* ; correspondance *point* à point entre objet et image dans l'oeil ;
- ▶ *matérialité de la lumière* : la lumière est une substance ;
- ▶ pas de rayons visuels, mais des *rayons se propageant en ligne droite de la source, ou de l'objet éclairé, à l'oeil*  
⇒ permet une Optique géométrique ;
- ▶ « *ce qui va de la source à l'objet qui lui fait face requiert un temps même si ce temps demeure caché à nos sens* »

Affirmation similaire chez **Ibn-Sinha** (Avicenne, 980-1037).

*Après la chute de l'Empire arabe, le débat ne reprendra vraiment qu'au XVII<sup>e</sup> siècle avec Descartes et Galilée ...*

# Descartes (1596-1650) : parabole de l'aveugle et du bâton

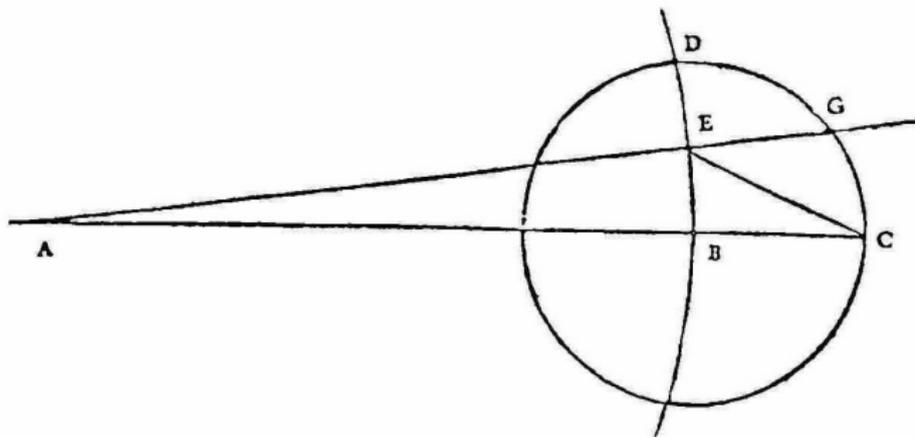
ceux qui, étant nés aveugles, s'en sont servis <sup>(du bâton)</sup> toute leur vie, et vous l'y trouverez si parfaite et si exacte qu'on pourrait quasi dire qu'ils voient des mains, ou que leur bâton est l'organe de quelque sixième sens qui leur a été donné au défaut de la vue. Et pour tirer une comparaison de ceci, je désire que vous pensiez que la lumière n'est autre chose, dans les corps qu'on nomme lumineux, qu'un certain mouvement, ou une action fort prompte et fort vive, qui passe vers nos yeux, par l'entremise de l'air et des autres corps transparents, en même façon que le mouvement ou la résistance des corps que rencontre cet aveugle passe vers sa main par l'entremise de son bâton. Ce qui vous empêchera d'abord de trouver étrange que cette lumière puisse étendre ses rayons en un instant depuis le soleil jusques à nous : car vous savez que l'action dont on meut l'un des bouts d'un bâton doit ainsi passer en un instant jusques à l'autre, et qu'elle y devrait passer en même sorte encore qu'il y aurait plus de distance qu'il y en a depuis la terre jusques aux cieux.

En suite de quoi vous aurez occasion de juger qu'il n'est pas besoin de supposer qu'il passe quelque chose de matériel depuis les objets jusques à nos yeux, pour nous faire voir les couleurs et la lumière, ni même qu'il y ait rien en ces objets qui

# Descartes et les éclipses de Lune

*(revu par Huygens, Traité de la lumière, 1690)*

Soit A le lieu du Soleil BD une partie de l'orbite ou chemin annuel de la Terre. ABC une ligne droite, que je suppose rencontrer le chemin de la Lune, représenté par le cercle CD, en C.



Or si la lumière demande du temps, par exemple une heure, pour traverser l'espace qui est entre la Terre et la Lune ; il s'ensuivra que la Terre étant parvenue en B, l'ombre qu'elle cause, ou l'interruption de la lumière, ne sera pas encore parvenue au point C, mais qu'elle n'y arrivera qu'une heure après. Ce sera donc une heure

# Descartes (1596-1650)

- ▶ propagation successive dans l'espace d'une *tendance au mouvement*, *sans* transport de matière, et obéissant aux *lois de la Mécanique* ;
- ▶ propagation instantanée « *hors du temps* » (parabole de l'aveugle et du bâton, et exemple des éclipses de lune)  
*Devrions-nous comprendre « vitesse infinie » ? Non*
- ▶ propagation « plus aisée » dans les milieux denses (eau, verre).  
*Devrions-nous comprendre « plus rapide »  
i.e. une vitesse « plus grande que l'infini » ?*

*Non à nouveau !*

# Galilée (1564-1642) en 1624



# Galilée

« *Discours sur deux sciences nouvelles* »  
(publié en 1638)

- ▶ une expérience non concluante, mais attitude *révolutionnaire* !
- ▶ Contrepied de Descartes : « La lumière met-elle un temps pour nous parvenir ? » *Mesurons* donc ce temps !
- ▶ expérience des deux lanternes : mesurer le *temps d'aller-retour* de la lumière entre deux protagonistes ;
- ▶ ... « *je ne l'ai exécutée que sur de petites distances, inférieures à un mille, et je n'ai pas pu décider, pour cette raison, si l'apparition de la lumière opposée est instantanée ; si elle ne l'est pas, elle est du moins extrêmement rapide, quasi immédiate ...* ».

# Galilée, Descartes et l'infini

## *Une vitesse inimaginable !*

- ▶ Galilée : « *si la lumière exigeait un certain temps, à une distance de trois milles, qui en font en réalité six si on considère le trajet de chaque lumière, le délai devrait être parfaitement observable . . . [sinon] on pourra conclure avec certitude que la propagation de la lumière est instantanée* ».
- ▶ cela signifierait pour nous, mais *seulement pour nous*, une vitesse supérieure à environ 90 km/s.
- ▶ idem pour Descartes : une heure de la Terre à la Lune (~ 360 000 km) correspond à 100 km/s !
- ▶ ainsi : l'analyse détaillée de l'exemple des éclipses de lune de Descartes et des deux lanternes de Galilée montre que : *est considérée comme instantanée une propagation non décelable par nos sens sur des distances usuelles, deux ou trois lieues (comme entre deux collines).*

- ▶ cela lève les contradictions apparentes dans la pensée de Descartes : non pas un temps nul, mais seulement un temps non décelable ;
- ▶ rien d'un infini *en acte* ! juste un tout petit pas sur le chemin d'un infini *en puissance*, mais une vitesse *inimaginable*.
- ▶ remarque : contrairement à Descartes, Galilée *accepte l'infini en acte* et en donne même implicitement la définition moderne, bien dans la filiation de Giordano Bruno (brûlé en 1600), et en opposition avec Aristote.

*Ainsi, au milieu du XVII<sup>e</sup> siècle, la question de la finitude de la vitesse de la lumière demeure ouverte*

*La solution émergera finalement à partir de préoccupations totalement différentes. . .*

# Les lunes de Jupiter et le problème des longitudes

- ▶ début XVII<sup>e</sup> siècle, un problème urgent :  
absence de connaissance précise des longitudes ⇒ naufrages en série et milliers de morts. Stopper cette hémorragie : il faut un *garde-temps précis*. Or il n'y en a pas !
- ▶ les lunes de Jupiter (Galilée, 1610) → une solution potentielle au problème des longitudes :  
*une horloge en plein ciel!*  
– pratiquement inutilisable en mer, mais excellente à terre.
- ▶ d'où une *intense activité* pour construire des éphémérides précises des lunes de Jupiter.
- ▶ *principal travail* : Jean-Dominique Cassini, au gnomon de San Petronio à Bologne, 15 années de dur travail (publié en 1668), ayant requis la résolution préalable du problème de la réfraction atmosphérique.

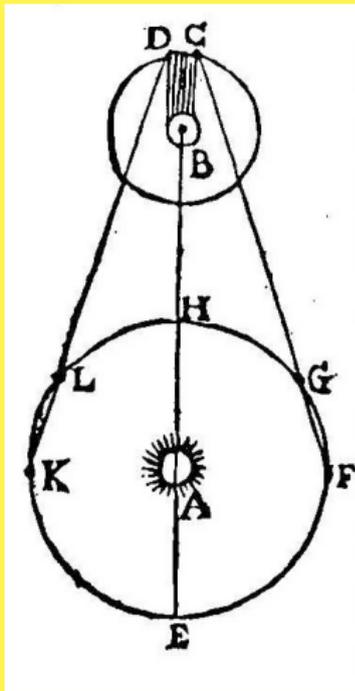
# Ole Römer (1644-1710) et Jean-Dominique Cassini (1625-1712)



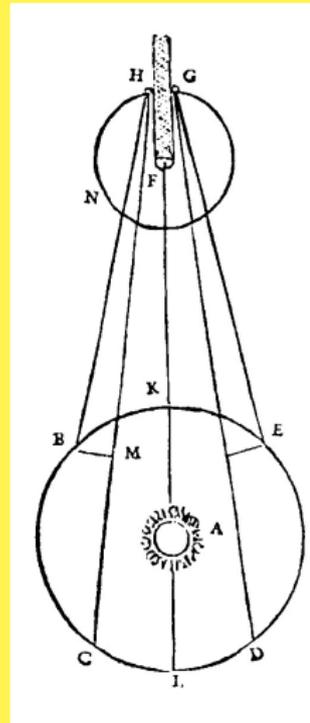
# Ole Römer à l'Observatoire de Paris : la solution

- ▶ un début de *recherche planifiée* : Cassini et Huygens appelés à Paris en tant que spécialistes mondiaux des longitudes. Y rencontrent le danois Römer<sup>2</sup>, les français Picard, La Hire, Richer.
- ▶ des *irrégularités observées dans la période de Io* (première lune de Jupiter) semblent corrélées au mouvement de la Terre.
- ▶ 1676 : compilation par Römer de tout un ensemble d'observations  $\Rightarrow$  la solution, publiée dans un article célèbre du *Journal des Sçavans* le 7 décembre.
- ▶ les variations apparentes de période s'expliquent par le *temps fini* que met la lumière pour nous venir de Jupiter, et conclut :  
« *La lumière met 22 minutes pour traverser l'orbite de la Terre* »

# Schéma de Römer



Römer, *Journal des sçavans*,  
7 décembre 1676



Revu par Huygens  
*Traité de la lumière*, 1690

# Bradley et l'aberration stellaire (1728)

- ▶ le monde scientifique *pas totalement convaincu* par Römer, à commencer par Cassini, pourtant co-auteur de l'idée de départ.
- ▶ 1728 : *conviction définitive* apportée par l'anglais Bradley découvrant et interprétant l'aberration stellaire, un petit mouvement elliptique apparent de toutes les étoiles.
- ▶ *vitesse orbitale de la Terre* et *vitesse finie* de la lumière d'une étoile *se combinent* pour donner un petit déplacement apparent de l'étoile dans la direction du mouvement de la Terre. Désormais, tout le monde est convaincu !
- ▶ vitesse de la lumière déduite des données de Bradley : autour de *300 000 km/s* à très peu près. Déjà en 1728 !

# Aberration stellaire (Bradley, 1728)

## Analogie avec la pluie



Lumière :  $\tan \beta = \frac{v}{c}$

$\beta \approx 10^{-4}$  rad soit  $20''$

L'explication la plus simple de l'aberration s'obtient par analogie avec la propagation de la lumière à celle des gouttes de pluie. Si le vent ne souffle, les gouttes de pluie tombent verticalement, l'homme au repos avec un parapluie directement au-dessus de sa tête ne sera pas mouillé. Si cet homme court, en tenant le parapluie dans la même position, le devant de son manteau sera mouillé. Par rapport à la personne, en mouvement, les gouttes de pluie

*Ainsi,  
au premier tiers du XVIII<sup>e</sup> siècle,  
la finitude de la vitesse de la lumière n'est plus en cause ,  
et sa valeur admise est autour de 300 000 km/s.*

Mais cette valeur numérique n'entre elle-même dans *aucune* problématique et n'a, évidemment, *aucune* application.

# Remarques sur le concept de vitesse

- ▶ ni Römer ni Bradley ne donnent de valeur explicite de la vitesse de la lumière, on la *déduit* de leurs données. Leur seul souci : résoudre une énigme astronomique.
- ▶ le style de la conclusion de Römer, bien dans l'esprit des anciens usages : le *temps requis* pour une *distance donnée*.
- ▶ Huygens (Traité de la lumière, 1690) : le premier à publier *une valeur explicite* à partir des données de Römer : une vitesse ...  
*« plus de six-cent mille fois plus grande que celle du son : ce qui est pourtant tout autre chose que d'être momentanée, puisqu'il y a la même différence que d'une chose finie à une infinie »*

Tout était dit.

Mais que le chemin fut long et difficile pour accepter une aussi fantastique vitesse !

# Conclusion du « grand débat »

*Une histoire éclairante !*

- ▶ depuis l'Antiquité, *débat abstrait* millénaire, culminant avec Descartes ;
- ▶ XVII<sup>e</sup> siècle : partant des besoins pratiques des marins, le premier exemple d'une recherche planifiée avec le *problème des longitudes* ;
- ▶ « par chance », les *lunes de Jupiter* semblent apporter une solution potentielle ;
- ▶ d'une manière complètement inattendue, la démonstration de la *finitude de la vitesse de la lumière* en résultera.

*Débats abstraits – modèles de la lumière – besoins pratiques – premières recherches planifiées – et de la chance. Tout cela !  
Ainsi se construit la science.*

# XIX<sup>e</sup> siècle : la vitesse de la lumière revient sur Terre !

- ▶ jusqu'au XIX<sup>e</sup> siècle, la valeur de la vitesse de la lumière *résulte uniquement d'observations astronomiques* et n'a aucune application pratique.
- ▶ milieu XIX<sup>e</sup> siècle : *elle se mesure sur Terre*. Nouveau !  
Conséquences :
  - ▶ un *critère* pour décider – croit-on – entre modèles de la lumière ;
  - ▶ un nouvel *outil* pour la mesure des distances.

# Ondes ou particules ?

*Un « corps » ou une « ondulation » ?*

- ▶ **Foucault, 1850** : comparaison *qualitative* de la vitesse de la lumière dans l'air et dans l'eau. Et pourquoi ?

- ▶ **Arago, 1838** :

*« Le système d'expériences . . . tranchera mathématiquement . . . une des questions les plus grandes et les plus débattues de la Philosophie naturelle. »*

- ▶ **Quelle si importante question ?** :

*« L'image supérieure est-elle moins avancée que celle d'en-bas ? Paraît-elle à sa gauche ? **La lumière est un corps.***

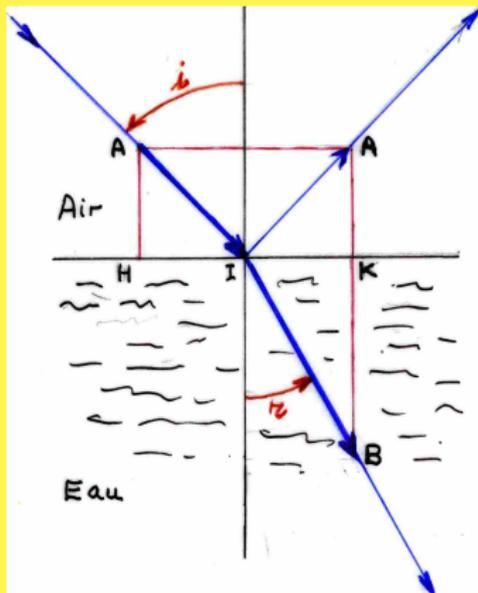
*Le contraire a-t-il lieu ? L'image supérieure se montre-t-elle à droite ? **La lumière est une ondulation.** »*

- ▶ **Conclusion de Foucault** :

*« La conclusion dernière de ce travail consiste donc à déclarer le **système de l'émission incompatible avec la réalité des faits.** »*

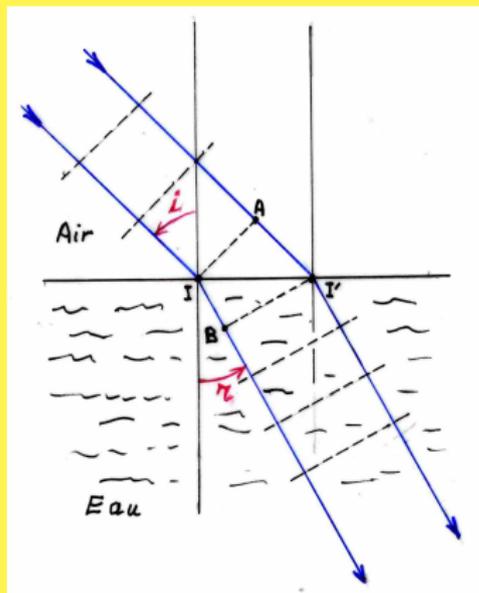
# Ondes ou corpuscules ?

Modèle de l'émission



Hyp.  $HI = IK$  et  $r < i$   
 $\Rightarrow IB > AI$

Modèle des ondes



$r < i \Rightarrow IB < AI'$

# Milieu XIX<sup>e</sup> siècle : un nouvel outil pour la mesure des distances

*Les mesures de Fizeau (1849) et Foucault (1862)*

La vitesse de la lumière entre dans le domaine de la Métrologie, ou

« *Comment la lumière deviendra la source de toutes les mesures* »

Charlotte Bigg

- ▶ L'observation des satellites de Jupiter donne directement le temps mis par la lumière pour traverser l'orbite de la Terre. Une mesure indépendante (sur Terre) de la vitesse de la lumière conduit au diamètre de cette orbite.
- ▶ à partir de l'aberration stellaire, sachant que

$$\text{angle d'aberration} : \beta \sim 10^{-4} \text{ rad} = \frac{\text{vitesse Terre}}{c}$$

connaissant  $c$ , on déduit la vitesse de la Terre sur son orbite ( $\sim 10^{-4}c$ ), d'où la longueur et le diamètre de cette l'orbite (sachant qu'elle est parcourue en un an).

- ▶ l'une et l'autre méthode conduisent donc à l'unité astronomique (u.a.), source de recherches depuis deux siècles.

Note :  $10^{-4} \text{ rad} \sim 20''$

# Pourquoi est-ce si important ?

- ▶ la non-observation des *parallaxes stellaires* a longtemps été un argument contre le mouvement orbital de la Terre.
- ▶ la première parallaxe stellaire (*61-Cygni*) est mesurée par Bessel, seulement en 1838 : 0,31" ;
- ▶ la base est un diamètre de l'orbite terrestre : 300 millions de kilomètres ou 2 u.a. D'où l'importance d'une détermination précise de l'u.a., jusque-là déterminée à partir des parallaxes planétaires.
- ▶ les distances stellaires deviennent *indépendantes de la figure et des dimensions de la Terre* :
  - « un gigantesque saut virtuel dans l'espace ! »

# Les mesures de Fizeau (1849) et Foucault (1862) : motivations

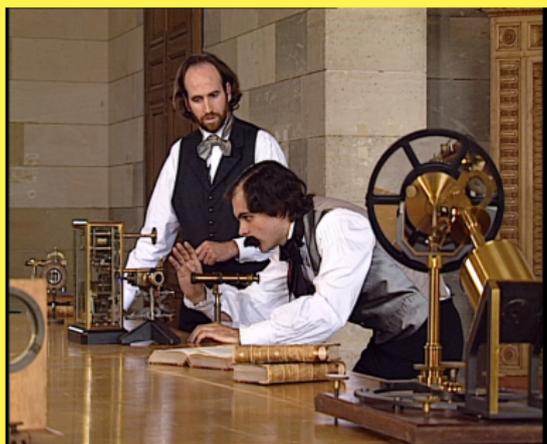
- ▶ **Arago, 1849** : (à l'Académie, après la mesure de Fizeau)  
*« En répétant ces observations avec des appareils mécaniquement plus parfaits, on pourra un jour, sans sortir de Paris et de sa banlieue, trouver cette **parallaxe du Soleil** qui, vers le milieu du siècle dernier, donna lieu à des voyages si longs, si lointains, si pénibles, et à tant de dépenses. »*
- ▶ **De quoi s'agit-il ?** Réponse dans le titre du compte-rendu de Foucault à l'Académie des Sciences, en 1862 :  
*« Détermination expérimentale de la vitesse de la lumière ; **parallaxe du Soleil** »*

# La mesure de Foucault de 1862

## *Vitesse absolue de la lumière dans l'air*

- ▶ Pour l'astronome Le Verrier, les distances Terre-Soleil données par les astronomes ( $\sim c = 308\,000$  km/s), comme celle déduite de la mesure de Fizeau (315 000 km/s) sont *surestimées* de quelques pourcents.
- ▶ Il demande à Foucault une *mesure précise* de la vitesse de la lumière.
- ▶ Foucault adapte son expérience de 1850 et publie  
**298 000 km/s**
- ▶ La distance Terre-Soleil en est *réduite* d'autant. Le Verrier est content !

# Un film d'Histoire des sciences « *Les magiciens de la lumière* »



Réalisation :

*Service de création audiovisuelle de la faculté d'Orsay (SCAVO)  
2009, Université Paris-Sud*

[https://www.canal-u.tv/video/scavo/les\\_magiciens\\_de\\_la\\_lumiere.18096](https://www.canal-u.tv/video/scavo/les_magiciens_de_la_lumiere.18096)

<http://www.webdocs.u-psud.fr/magicienslumiere/>



# L'équipe du film



## *L'équipe du film*

Réalisateurs	:	Christine AZÉMAR (SCAVO) et Serge GUYON (SCAVO)
Cadreur	:	Max RELID (SCAVO)
Auteurs scientifiques	:	Alain SAREFATI (Lab. A. Cotton et SCAVO) et Pierre LAUGINIE (GHDSO)
Documentation	:	Maria DESCARGUES (SCAVO)
Dialogues	:	Laurent BARATTON (École polytechnique)
Producteur	:	Université Paris-Sud, SCAVO
Co-producteurs	:	Observ. de Paris, Triangle de la Physique
Textes (livret et DVD-2)	:	Pierre LAUGINIE

(Les images se lisent de gauche à droite et de haut en bas)

# Principe du miroir tournant, version pédagogique moderne

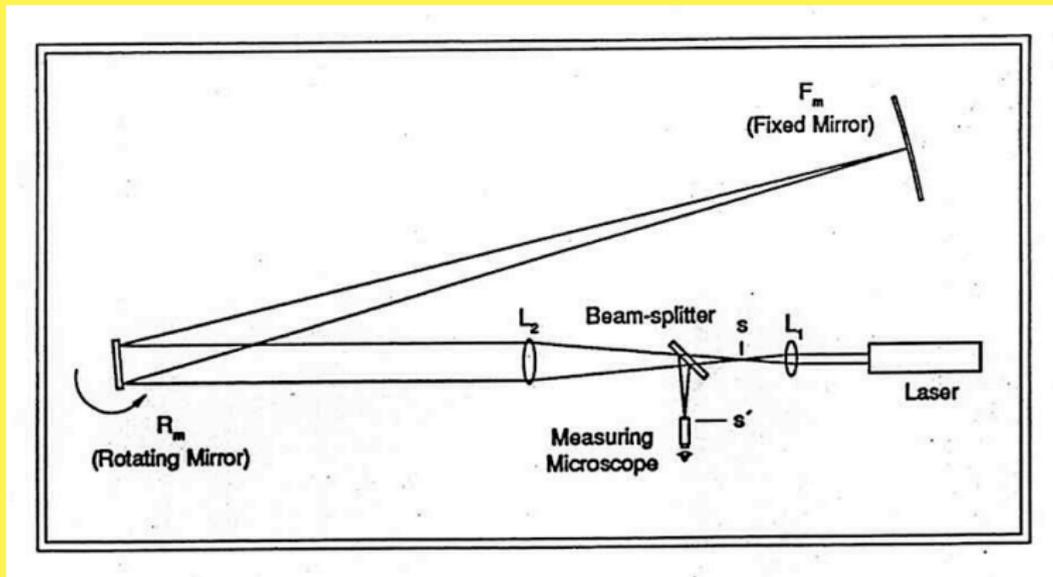
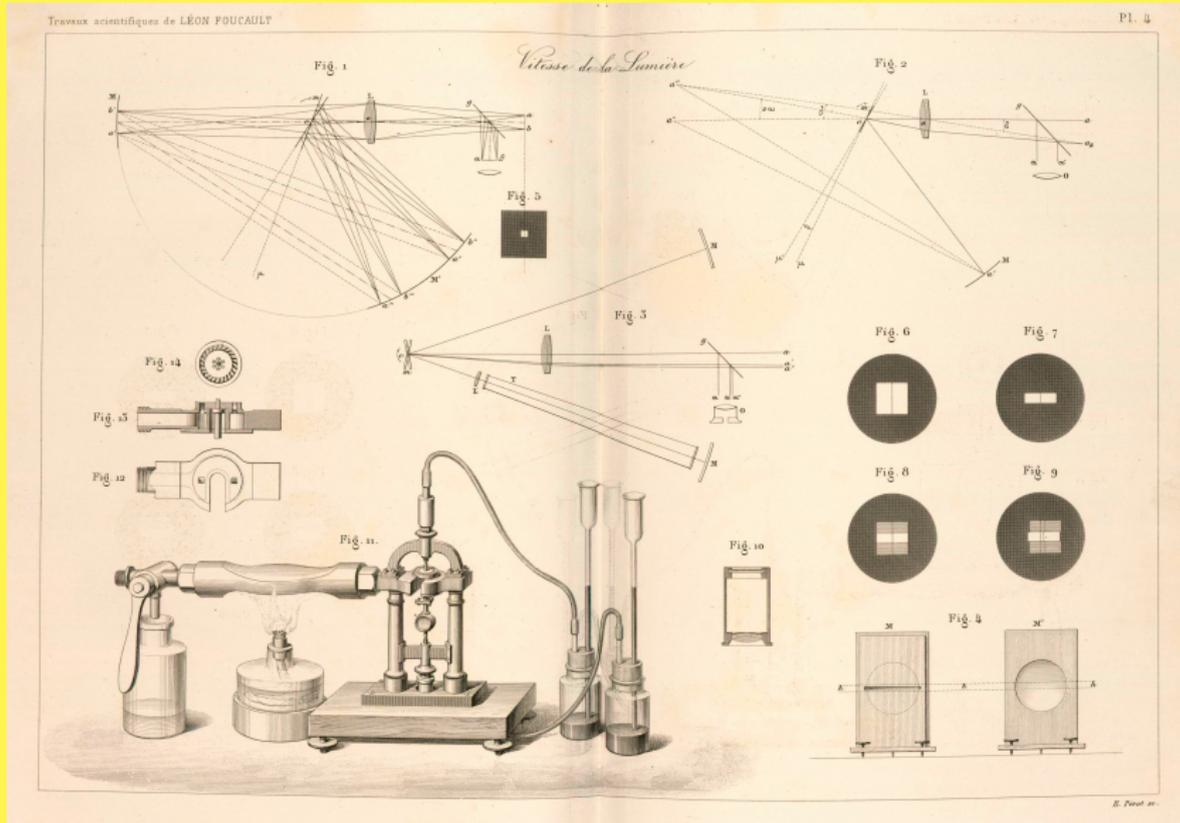
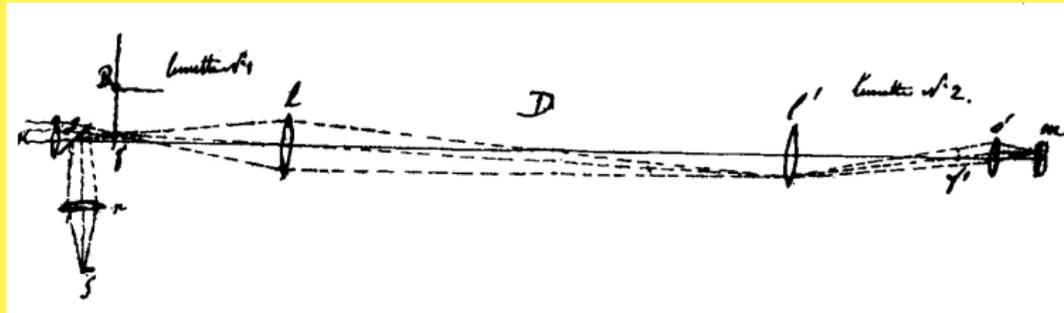
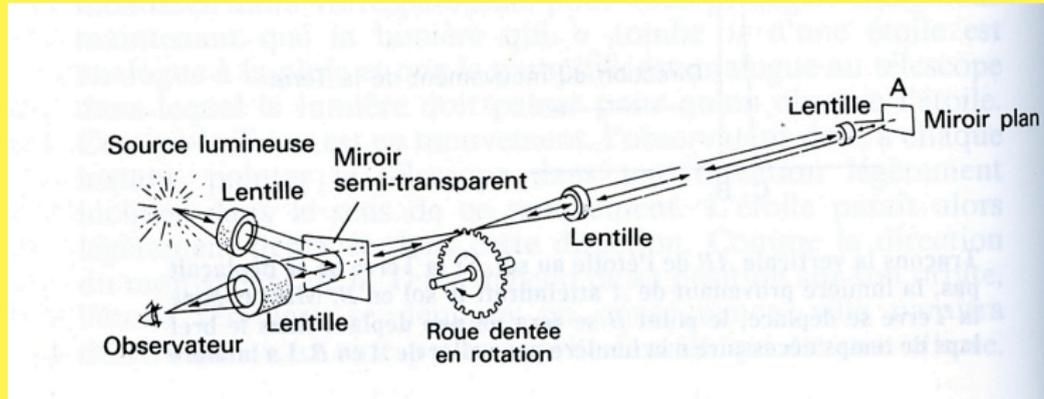


Schéma du montage moderne utilisé en enseignement  
(modèle PASCO)

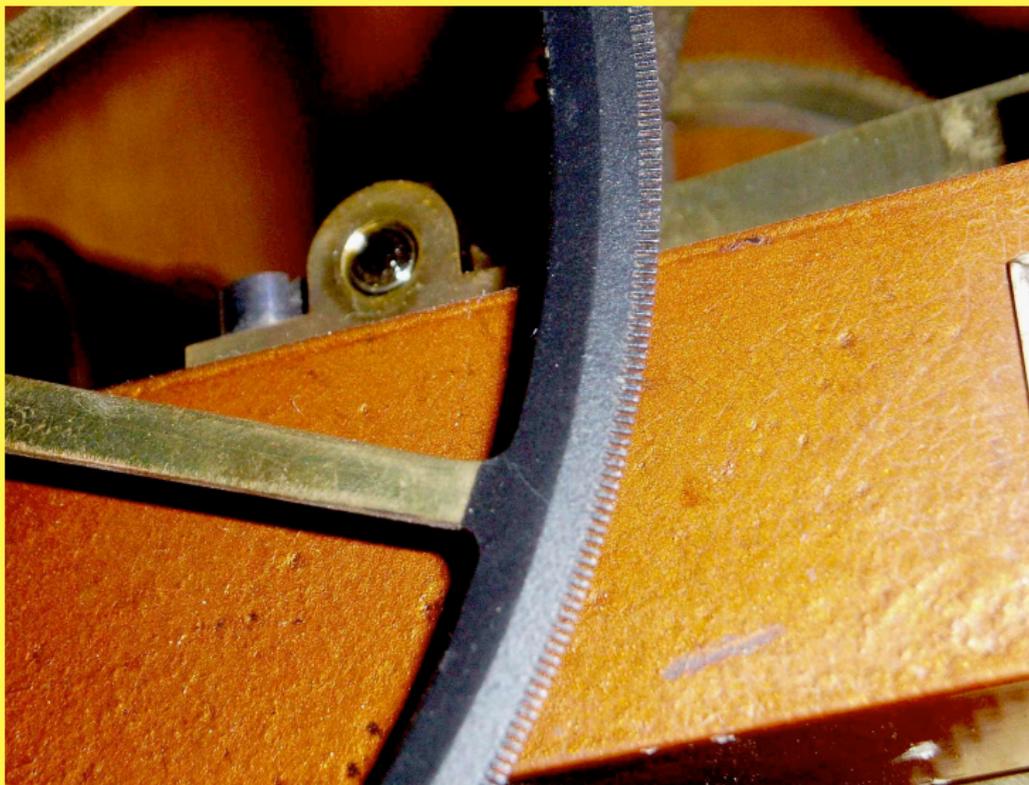
# L'expérience de Foucault de 1850 : planche originale



# Schéma expérience de Fizeau (1849)



# Appareil de Fizeau : détail de la roue dentée



Diamètre : 15,4 cm ; nombre de dents : 720 ; intervalle inter-dents : 0,3 mm.