



# La lumière et sa vitesse, d'un débat abstrait à un outil métrologique

Pierre Lauginie

Maître de Conférences honoraire  
Groupe d'Histoire et de Diffusion des Sciences d'Orsay, Université Paris-Sud

## Un débat bi-millénaire

La lumière a-t-elle une vitesse ? La réponse à cette question – qui peut nous paraître évidente – pendant fort longtemps n'est pas allée de soi.

Le débat naît dès les tout débuts de la science grecque, bien avant notre ère. La question est alors : la lumière d'un astre prend-elle du temps pour venir jusqu'à nous, ou, au contraire, sa propagation se fait-elle *dans l'instant* ?

Les plus grands noms participent au débat : Empédocle d'Agrigente, Platon, Aristote, Euclide, Lucrèce. À l'exception d'Empédocle, le paradigme dominant sera l'instantanéité du phénomène lumineux.

Le débat reprendra à l'âge d'or des sciences arabes, X<sup>e</sup>–XI<sup>e</sup> siècles. Ibn Sinha, dit Avicenne, et Ibn al-Haytham, dit al-Hazen, soutiennent la matérialité et la temporalité du phénomène lumineux : «*Ce qui va de l'ouverture (la source) au corps qui lui fait face n'existe que dans un temps, même si cela est dissimulé aux sens*». (Ibn al-Haytham).

Le débat est relancé dans la première moitié du XVII<sup>e</sup> siècle avec Descartes : propagation *successive dans l'espace* d'une tendance au mouvement – sorte de potentialité – et cependant *sans délai* croit-il, *hors du temps*. Pas question, dans ces conditions, de parler de vitesse.

Quasi simultanément, Galilée, en bon ingénieur, renverse les termes du débat : «*La lumière met-elle un temps pour venir à nous ? Mesurons donc ce temps, et nous verrons bien*». Son expérience des deux lanternes ne sera pas concluante, mais peu importe : la question est posée sur des bases nouvelles. Une révolution.

## Où la lumière acquiert une vitesse

La solution – comme souvent en sciences – viendra d'un horizon complètement inattendu. Galilée – encore lui – découvrant en 1610 les quatre lunes orbitant autour de Jupiter, croit voir en elles la solution d'un problème majeur : se repérer sur terre et surtout en mer. En effet, voilà une horloge en plein ciel ! Bien qu'impraticable en mer, sa méthode sera utilisée pendant près de deux siècles pour la cartographie terrestre.

C'est l'origine de nombreux travaux sur les satellites de Jupiter afin d'en obtenir des éphémérides précises. Ceux-ci mettent bientôt en évidence certaines irrégularités de période du premier satellite, ultérieurement dit **Io**, qui semblent corrélées au mouvement orbital de la Terre. À l'Observatoire de Paris, Roemer comprend que ces irrégularités, seulement apparentes, sont liées au temps que met la lumière pour nous parvenir depuis Jupiter. Dans un article célèbre, publié en 1676, il établit que la lumière met vingt deux-minutes pour traverser l'orbite de la Terre, soit deux fois la distance Terre-Soleil (valeur moderne : 16 min 38 s, voir l'article de Suzanne Débarbat dans cette brochure).

Un peu plus tard, en 1690, le Néerlandais Huygens exprimera ce résultat sous forme d'une vitesse *« plus de six cent mille fois plus grande que la vitesse du son. Ce qui toutefois est tout autre chose que d'être momentanée, puisqu'il y a la même différence que d'une chose finie à une infinie »*.

Le monde scientifique ne sera définitivement convaincu qu'en 1728. Le Britannique Bradley découvre alors l'aberration stellaire : une petite modification de la position apparente des étoiles liée à la vitesse de la lumière. C'est l'analogue, pour la lumière tombant d'une étoile, de la déviation par rapport à la verticale des gouttes de pluie vues depuis un véhicule en déplacement. Le véhicule est la Terre, et l'aberration s'explique parfaitement sous l'hypothèse d'une vitesse finie de la lumière.

Comme Roemer, Bradley ne donne pas de valeur numérique pour cette vitesse. Cependant, la valeur que l'on peut déduire de ses données est déjà très voisine de 300 000 km/s. Ainsi, au milieu du XVIII<sup>e</sup> siècle, la finitude de la vitesse de la lumière est enfin définitivement acquise et sa valeur, *uniquement déduite d'observations astronomiques*, est déjà centrée sur la valeur moderne. Mais cette valeur n'entre, par elle-même, dans aucune problématique et n'a évidemment aucune application. Sur ce sujet, il ne se passera rien de fondamentalement nouveau avant un siècle. Au milieu du XIX<sup>e</sup> siècle, la possibilité nouvelle de mesurer la vitesse de la lumière sur Terre suscite une motivation nouvelle dans deux directions. Sous l'impulsion d'Arago, deux types d'expériences vont se

développer avec des finalités très différentes : théorique ou épistémologique d'une part, métrologique d'autre part.

## La nature de la lumière : une expérience *cruciale* ?

Le débat sur la *nature de la lumière*, relancé au début du XVII<sup>e</sup> siècle par Descartes, se cristallise avec Newton et Huygens : ou bien une *émission de corpuscules*, ou bien une *onde* dans un *éther* sur le modèle de l'onde sonore, que propose Huygens ; ou bien un *corps*, ou bien une *ondulation*.

Après la prééminence du modèle corpusculaire au XVIII<sup>e</sup> siècle, la première moitié du XIX<sup>e</sup> est dominée par l'irrésistible montée en puissance du modèle ondulatoire avec Young, Fresnel et Arago notamment. En 1840 le sort du modèle corpusculaire est virtuellement réglé. Néanmoins, Arago croit pouvoir proposer une expérience *cruciale* pour départager les deux modèles :

- le modèle corpusculaire, *tel que conçu* à l'époque, prévoit que la vitesse de la lumière doit être plus grande dans l'eau que dans l'air ;
- le modèle ondulatoire prévoit l'inverse.

Faisons donc l'expérience et – croit-on – la question sera réglée !

Foucault et Fizeau en 1850, d'abord ensemble, puis séparément, utilisant un dispositif à miroir tournant, se lancent dans une comparaison *qualitative* des vitesses dans l'air et dans l'eau. Foucault arrive le premier : la lumière *ralentit* en entrant dans l'eau.

Le modèle corpusculaire est rejeté. Alors, expérience *cruciale* ? Non. Mais ce n'est généralement pas souligné à l'époque. De fait, l'expérience de Foucault rejette non pas *tout modèle corpusculaire*, mais seulement une *hypothèse très particulière* remontant à Descartes dont était affecté le modèle de l'époque : la conservation de la composante de vitesse parallèle au plan de séparation. Et, un demi-siècle plus tard, le photon, cet étrange enfant de Planck et Einstein, se conformera sagement au résultat de Foucault !

## Un outil pour la mesure des distances

D'autre part, vont apparaître les premières tentatives de mesure absolue sur Terre de la vitesse de la lumière dans l'air. Pourquoi un tel intérêt tout à coup ? Est-ce important ?

La non-observation des parallaxes stellaires<sup>1</sup> a longtemps été un argument contre le mouvement orbital de la Terre. La première d'entre elles n'est mesurée par Bessel qu'en 1838, et sa valeur n'est que 0,31". La base utilisée est un diamètre de l'orbite terrestre, soit environ 300 millions de km, ou deux fois la distance Terre-Soleil (dite *unité astronomique*, u.a.). D'où l'importance d'une détermination précise de cette distance.

Or, la connaissance indépendante de la vitesse de la lumière par une mesure terrestre va permettre d'inverser les raisonnements des astronomes. Par exemple, le temps mis par la lumière pour traverser l'orbite de la Terre est connu à partir de l'observation des satellites de Jupiter ; en le combinant avec la vitesse de la lumière, on obtient le diamètre de cette orbite. De même, une mesure d'aberration *dans le ciel*, combinée à la vitesse de la lumière, conduit aussi à la distance Terre-Soleil. Ce que comprend Arago. La vitesse de la lumière va entrer dans le domaine de la métrologie.

La première détermination terrestre est effectuée en 1849 par Fizeau grâce à un dispositif à roue dentée qui *hache* un faisceau lumineux envoyé en aller-retour de Suresnes à Montmartre (figure 1). Fizeau publie 315 000 km/s, valeur sensiblement supérieure à celle des astronomes. Mais il ne s'agit pas encore d'une détermination définitive. Citons Arago :

*«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<sup>2</sup> qui, vers le milieu du siècle dernier, donna lieu à des voyages si longs, si lointains, si pénibles, et à tant de dépenses».*

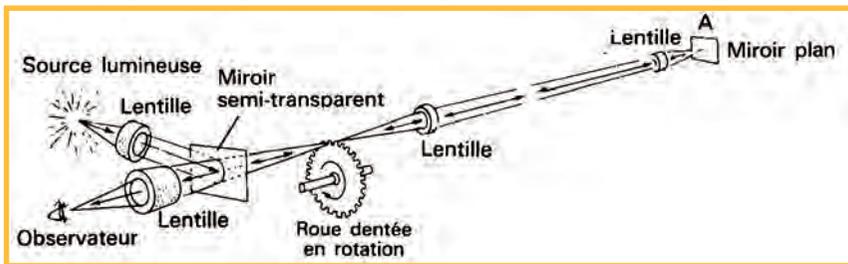


Figure 1

Schéma de l'expérience de Fizeau. La vitesse de la roue dentée est ajustée de manière que le faisceau, qui est passé *dans un creux* à l'aller, tombe sur une dent au retour. D'où le temps d'aller-retour.

<sup>1</sup> Parallaxe : généralement, différence entre les angles de visée d'un point donné (planète, étoile), depuis deux points d'observation éloignés dont la distance est connue et constitue la *base*. Parallaxe stellaire : angle sous lequel le demi-grand axe de l'orbite de la Terre est vu depuis une étoile.

<sup>2</sup> Parallaxe du Soleil : angle sous lequel le rayon de la Terre est vu depuis le centre du Soleil. Cela équivaut à connaître sa distance.

Une douzaine d'années plus tard, Le Verrier, directeur de l'Observatoire, demande à Foucault d'adapter son expérience qualitative de 1850 à une mesure quantitative précise. En effet, ses calculs d'interactions mutuelles des planètes lui font penser que les valeurs de la distance Terre-Soleil données par les astronomes, comme celle déduite de la mesure de Fizeau, sont surestimées de quelques pourcents. Foucault mène l'expérience à bien en 1862 (figure 2) et publie 298 000 km/s. Le Verrier est satisfait. De ce jour, la vitesse de la lumière, devient, en puissance, l'outil idéal pour la mesure des distances. Cerise sur le gâteau : contrairement aux parallaxes planétaires, cette nouvelle méthode est indépendante de la *figure* et des dimensions de la Terre : un gigantesque saut virtuel dans l'espace

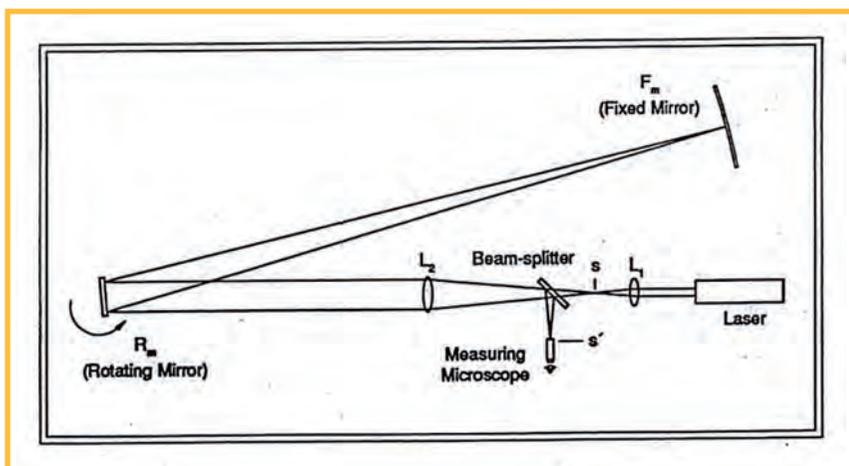


Figure 2

Principe de l'expérience du miroir tournant de Foucault

Schéma du montage pédagogique utilisé aujourd'hui en enseignement (modèle PASCO). Pendant l'aller-retour de la lumière entre les deux miroirs, le miroir tournant a pivoté légèrement, de sorte que le faisceau de retour est renvoyé dans une direction légèrement différente de l'incidente. D'où l'on déduit le temps d'aller-retour de la lumière.

Cette adaptation d'une expérience initiale qualitative à une expérience précise de métrologie, constitue une riche illustration des technologies de l'époque et de leur évolution : prise en compte d'avancées mathématiques pour le dessin de la turbine entraînant le miroir (figure 3), raffinement des détails mécaniques, appel au célèbre facteur d'orgue de l'époque – Cavallé-Coll – pour la réalisation de la soufflerie entraînant la turbine (figure 4), construction d'une horloge stroboscopique de haute précision (figure 5).



Figure 3

Le miroir tournant de Foucault et sa turbine

Noter qu'il a perdu son argenture.

*(Observatoire de Paris)*

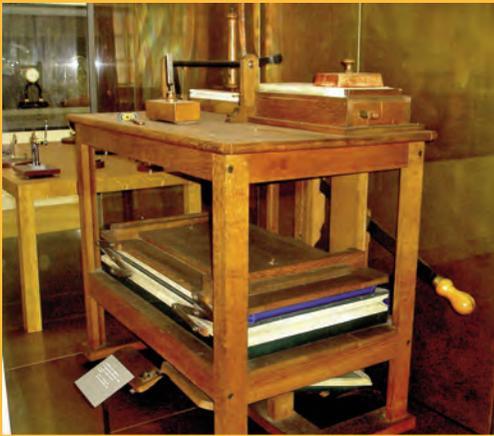


Figure 4

La soufflerie de Cavallé-Coll qui alimente la turbine du miroir tournant.

*(Musée des arts et métiers, Paris)*

Figure 5  
L'horloge stroboscopique

L'horloge entraîne un disque denté (en avant) qui permet la mesure de la vitesse de rotation du miroir par effet stroboscopique.

(Observatoire de Paris)



Après Foucault, la vitesse de la lumière n'est pas encore la constante fondamentale que nous connaissons, *indépendante de tout*, du mouvement de la source comme de celui de l'observateur. Cependant les premiers indices troublants de cette indépendance remontent au XVIII<sup>e</sup> siècle avec l'observation des premières étoiles doubles. Et aux expériences d'Arago et Fresnel au début du XIX<sup>e</sup>. Le siècle vivra avec ce problème latent. On connaît la suite : cette indépendance, replacée dans le cadre d'une théorie générale – la relativité d'Einstein – rend aujourd'hui cet outil d'autant plus précieux pour la mesure des distances.

Les deux expériences de Foucault, 1850 et 1862, avec le même principe de base, en partie le même matériel et donc le même expérimentateur, sont emblématiques des deux grandes catégories d'expériences scientifiques. D'une part, des expériences à finalité épistémologique : établir, illustrer une loi ou un modèle, réfuter ou valider des théories. D'autre part, des expériences précises de métrologie : dans ce dernier cas, personne ne connaît à l'avance le *vrai* résultat. Et c'est très différent.

Léon Foucault, lui, s'est illustré dans les deux domaines.

**P. L.**

**Pour en savoir plus :**

William Tobin, *Léon Foucault*, Les Ulis, EDP-Sciences (2002)

*Les magiciens de la lumière*, un film du SCAVO, Université Paris-Sud, Faculté d'Orsay. Contact : Christine Azémar, co-réalisatrice, [christine.azemar@u-psud.fr](mailto:christine.azemar@u-psud.fr)