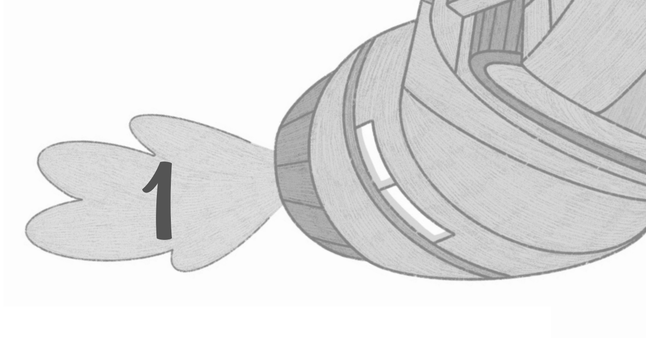
Alain Le Rille

Histoire de la VITESSE DE LA LUMIÈRE

en 19 expériences

Illustrations de
Camchtok

ellipses



Rapide comme l’éclair

L’expérience de la roue dentée par Fizeau en 1849

Longtemps le débat a été ouvert sur la question suivante : la lumière se propage-t-elle instantanément, ce qui revient à dire que sa vitesse est infinie ? Ou bien nous parvient-elle avec un retard, c’est-à-dire que sa vitesse est finie (non infinie) ? Au Moyen Âge et à la Renaissance, les scientifiques s’attaquent à cet épineux problème dans le cadre d’une démarche expérimentale balbutiante. Las : la vitesse de la lumière est bien trop grande pour se laisser mesurer facilement !

Il faudra un dispositif mécanique motorisé au XIXe siècle pour réussir à mesurer sur Terre, pour la première fois, la vitesse de la lumière.

Quelques jalons historiques

- Autour de l’an 1000 : Alhazen a l’idée du protocole de la mesure de la vitesse de la lumière, *c*.
- Début du XVIIe siècle : la tentative de la mesure de *c* par Galilée est un échec.
- 1849 : Fizeau réalise la première mesure de *c* sur Terre.

Une clé pour l'expérience

L'orage : son et lumière !

L'orage est là. De gigantesques décharges électriques ont lieu, entre ciel et terre, provoquant dans leur fureur le flash lumineux de l'éclair et le bruit du tonnerre. Tout le monde a déjà vécu un tel épisode : c'est la nuit et on reste bien à l'abri dans la maison. Il arrive que le courant électrique ait été coupé, plongeant la pièce dans le noir, mais les éclairs déchirent le ciel de leurs zébrures lumineuses, projetant à travers les fenêtres les ombres fantomatiques de quelques arbres. On entend ensuite le grondement du tonnerre qui fait vibrer les vitres de la maison. L'orage est là, il se rapproche. Les éclairs sont de plus en plus lumineux, les coups de tonnerre de plus en plus assourdissants. Et les deux phénomènes, acoustique et visuel, sont de plus en plus rapprochés.

Un nouvel éclair soudain illumine le salon. Quelqu'un compte. « Une, deux, trois ». Quelqu'un compte les secondes jusqu'à ce que le bruit du tonnerre l'interrompe. « L'orage n'est plus qu'à un kilomètre désormais ». Alors on lui demande, à la personne qui compte : « comment le sais-tu, toi, que l'orage est à cette distance de nous ? ». Et elle de répondre : « le son est une onde qui se propage à une vitesse de 340 mètres par seconde. Il suffit de compter le nombre de secondes entre l'éclair et le tonnerre et l'on sait à quelle distance se trouve l'orage : 3 secondes fois 340 mètres par seconde ça fait 1020 mètres, à peu près un kilomètre donc ». Ainsi donc, il suffit de déclencher le chronomètre au moment où l'on voit un éclair et de l'arrêter au moment où l'on entend le tonnerre. Comme la vitesse est le rapport entre la distance et le temps écoulé, un simple calcul donne la distance : c'est la durée multipliée par la vitesse du son.

Interrogeons-nous sur le « top départ », cet instant où l'on déclenche le chronomètre. À ce moment, ce que l'on perçoit, c'est de la lumière. Mais quand on voit l'éclair, est-ce quand la décharge électrique a lieu effectivement ? Quand on voit l'éclair c'est peut-être plus tard, le temps que la lumière nous parvienne, tout comme le son a mis du temps pour venir jusqu'à nous, un peu plus tard que le tonnerre. En déclenchant le chronomètre au moment où l'on voit l'éclair, on fait comme si le phénomène avait lieu au même instant que notre constatation du phénomène. Cela revient à supposer que le signal lumineux est arrivé à nous instantanément, sans subir de retard. Autrement dit que la vitesse de la lumière est… infinie ! Peut-être est-elle en fait suffisamment grande, beaucoup plus grande que celle du son, pour qu'on ait l'impression que la lumière nous arrive sans retard.

Pour connaître la vitesse de la lumière, il faudrait faire comme avec le son : mesurer la durée entre la création d'un éclair et sa visualisation, plus loin. C'est l'idée que met en œuvre Fizeau en 1849 : il crée comme un flash et détermine le temps qui est nécessaire pour que la lumière nous arrive. Mais cela nécessite une mécanique très précise…


BRAOUM
L'ORAGE EST À 1KM !
C'EST FACILE COMME BONJOUR !

Une histoire de l'expérience

En faisant la comparaison avec le son, Aristote se demande , dans *De Sensu*, « En est-il de même pour la lumière et met-elle un temps plus ou moins long pour venir du Soleil jusqu'à nous, ainsi que l'a soutenu Empédocle ? Cette opinion paraît fort rationnelle ; mais cependant elle n'est pas exacte. » La propagation de la lumière est-elle instantanée ou nécessite-t-elle du temps ? Aristote pense que les phénomènes sous-jacents impliqués dans la vision et dans d'autres sens sont fondamentalement différents : « On peut soutenir la transmission successive et pour l'odeur et pour le son, qui sont certainement des mouvements ; il est impossible d'en dire autant de la lumière : il semble plutôt que la lumière soit une modification d'une certaine espèce que le milieu éprouve simultanément, et c'est là ce qui fait croire qu'il n'y a pas pour elle de transmission successive. » Au contraire, Platon écrit dans le *Timée* que la lumière est « un feu qui ne brûle pas » se déplaçant à grande vitesse, « un courant de parties lisses et pressées » qui émane des yeux comme des objets en donnant la sensation de la vue.

Faute d'expérience probante, certains philosophes grecs soutiennent une thèse (la propagation instantanée), d'autres l'autre (la vitesse non infinie). Au sortir de l'Antiquité, les deux ouvrages de référence sur la lumière sont celui d'Euclide et celui de Claude Ptolémée. Si la notion de rayon lumineux rectiligne est y bien définie (ces rayons étant émis par l'œil selon ces auteurs…) le débat n'est pas tranché sur la célérité de la lumière.

Alhazen remet la lumière dans le bon sens

C'est un savant perse, vers l'an mille, Alhazen, qui va révolutionner les connaissances en la matière. Dans son *Traité d'Optique*, qui sera traduit en latin deux siècles plus tard, sont exposés ses travaux qui ont donc lieu bien avant ceux des scientifiques européens de la Renaissance. Alhazen va s'appuyer sur la démarche expérimentale pour développer ses idées. Il décrit le problème auquel il s'intéresse, il collecte des informations par le biais de ses observations, il formule une hypothèse, il expérimente à nouveau afin de vérifier son hypothèse, il répète ses mesures pour confirmer les résultats, avant d'indiquer enfin ses conclusions.

Alhazen va employer des lanternes, des tubes, des diaphragmes, des chambres noires, des sténopés, des lentilles sphériques… Il montre que la vision est le résultat de la pénétration dans l'œil des rayons lumineux. Pour Alhazen, l'œil est un instrument d'optique comme les autres, se conformant aux lois de l'optique géométrique. Mais l'activité cérébrale qui suit le travail de l'œil aboutit parfois à des erreurs : Alhazen montre ainsi que le fait que la Lune semble plus grosse à l'horizon est principalement due à une fausse interprétation du cerveau.

Alors, que pense Alhazen de la vitesse de la lumière ? Le grand savant perse fait l'hypothèse que la lumière est une substance matérielle, dont la propagation demande du temps. Il imagine un protocole expérimental pour tester cette idée : il faudrait faire passer la lumière par un trou dans un mur et l'observer sur le mur opposé. « Si le trou a été recouvert d'un rideau et que le rideau est retiré, le voyage de la lumière du trou au mur opposé devrait prendre du temps » écrit-il. Mais l'expérience est vouée à l'échec : la propagation de la lumière est impossible à discerner dans le cadre de ce protocole car elle est trop rapide.

Galilée ne confond pas ses lanternes avec des vessies

Bien plus tard, un Italien a une idée d'expérience assez proche. Il s'agit de Galilée qui, au début du XVII^e siècle, demande à un de ses assistants de se placer, comme lui, sur un sommet de colline. Les deux hommes sont à 1 800 mètres de distance. Chacun a une lanterne à volet. À un instant donné, Galilée découvre le volet de sa lanterne et déclenche dans le même temps le décompte du temps avec sa clepsydre (un appareil qui mesure les durées grâce à un écoulement, comme un sablier). Lorsque son assistant voit la lumière émise par Galilée, il découvre sa propre lanterne. Galilée arrête alors le décompte du temps dès qu'il voit la lumière émise sur l'autre colline.

Galilée répète l'expérience plusieurs fois, tout en augmentant de plus en plus la distance qui le sépare de son assistant. Mais, malgré ses nombreux essais, les durées mesurées restent les mêmes. On sait aujourd'hui que le temps mis par la lumière pour parcourir cette distance est de l'ordre de quelques millionièmes de seconde, durée impossible à mesurer avec les moyens de l'époque, et bien plus courte que le temps de réaction de Galilée et de son assistant. C'est en fait ce temps de réaction qui détermine la durée mesurée dans l'expérience. Plutôt que de conclure de son expérience que la lumière se propage instantanément, à une vitesse infinie, Galilée en déduit que si la lumière a une vitesse de propagation elle serait beaucoup trop grande pour être mesurée selon son protocole. On voit que l'idée de l'expérience de

Galilée est sensiblement la même que celle d'Alhazen. Elle est cependant réalisée sur une distance bien plus grande… mais pas assez toutefois. La vitesse de la lumière ne se laisse pas mesurer si facilement.

Les 720 dents de Fizeau à Suresnes

Il a fallu attendre le milieu du XIX^e siècle pour mettre en œuvre de façon satisfaisante l'idée d'Alhazen et de Galilée. C'est un physicien français, Hippolyte Fizeau, qui réalise en 1849 une expérience pour déterminer la célérité de la lumière dans l'air dont le principe est fondamentalement le même que celui imaginé par Galilée. Il s'agit de mesurer la durée mise par le signal lumineux pour aller d'un point à un autre, puis revenir. Mais Fizeau améliore de plusieurs façons le protocole de l'Italien.

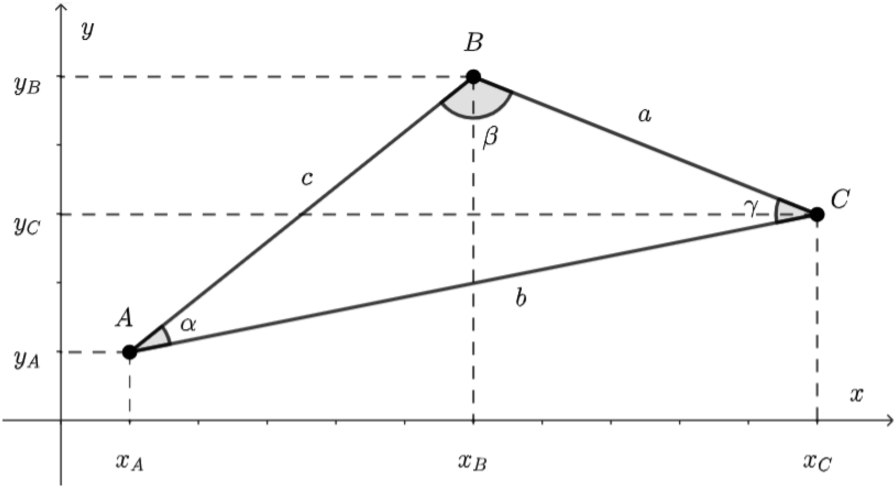
D'abord, il augmente la distance entre les deux points. Si la lumière va toujours d'une colline (le Mont Valérien) à une autre (Montmartre) avant de revenir, cette fois-ci les deux sommets sont beaucoup plus éloignés : la distance entre les deux points, mesurée précisément par triangulation (cf. p. 23) est de 8 630 mètres. Fizeau utilise la maison de famille de Suresnes, dans la banlieue ouest de Paris, achetée par son père, Louis-Aimé, un ami du célèbre Laënnec. La famille Fizeau a l'habitude de passer des moments de villégiature bien agréables dans ce petit coin de verdure avec ses invités, parmi lesquels l'écrivain Honoré de Balzac. La maison offre une très belle vue sur Paris car elle est en hauteur. À tel point que, lorsqu'en 1855 le conseil municipal l'achète pour en faire la mairie, elle est équipée du premier télégraphe de la ville. C'est depuis cette maison de Suresnes, en 1849, qu'Hippolyte va envoyer des impulsions lumineuses jusqu'à la fenêtre d'un ami à Montmartre, pour mesurer la vitesse de la lumière.

À une telle distance, cela devient difficile de voir une source lumineuse. Aussi, pour discerner correctement les émissions lumineuses, Fizeau focalise les rayons avec des lunettes, les forçant à rester dans un « pinceau » qui évite en quelque sorte la dilution de l'éclairement dans toutes les directions. Plutôt que de compter sur la rapidité humaine pour déplacer un cache devant une source, Fizeau utilise un moteur qui fait tourner une roue dont les 720 dents se déplacent à grande vitesse, jouant le rôle de l'obturateur ultra rapide qui manquait à Galilée. Ainsi, le dispositif émet comme des flashs de lumière lorsque celle-ci passe dans l'échancrure qui sépare deux dents de la roue. Il suffit que ce flash revienne exactement au moment où une dent bloque son passage pour déterminer le temps qu'il a mis à faire l'aller-retour pour Montmartre. En déterminant la vitesse de rotation de la roue, Fizeau en déduit la célérité de la lumière dans l'air, c.

Hippolyte Fizeau est capable en 1849 d'en estimer la valeur autour de 300 mille kilomètres par seconde. Si ce n'est pas la première mesure de c (comme nous le verrons plus tard), c'est la première effectuée sans recours à l'astronomie.

La triangulation *encadré 1*

Sur Terre, on s'intéresse à trois points, nommés A, B et C, suffisamment proches les uns des autres et en hauteur, de façon à ce que puissent être observés de n'importe quel point les deux autres points. On connaît les positions de $A\ (x_A, y_A)$ et $B\ (x_B, y_B)$ et on veut déterminer la position de $C\ (x_C, y_C)$. On note les distances $a = BC$, $b = AC$ et $c = AB$, et les angles $\alpha = \widehat{BAC}$, $\beta = \widehat{CBA}$ et $\gamma = \widehat{ACB}$.



On fait depuis A la mesure de α (grâce à un « théodolithe ») et depuis B celle de β. Comme la somme des angles dans un triangle vaut π radians (180°), on en déduit $\gamma = \pi - \alpha - \beta$. On connaît la distance $c = \sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2}$.

La formule des sinus dans le triangle (ABC) donne : $\dfrac{\sin\alpha}{a} = \dfrac{\sin\beta}{b} = \dfrac{\sin\gamma}{c}$ ce qui permet de déduire les deux équations :

$$\begin{cases} a = \dfrac{\sin\alpha}{\sin\gamma} c = \sqrt{(x_C - x_B)^2 + (y_C - y_B)^2} \\ \\ b = \dfrac{\sin\beta}{\sin\gamma} c = \sqrt{(x_C - x_A)^2 + (y_C - y_A)^2} \end{cases}$$

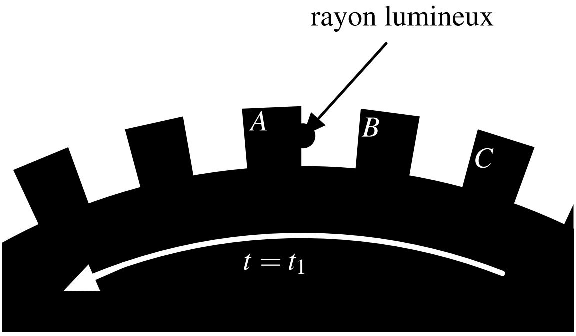
qui suffisent pour calculer les coordonnées du point $C\ (x_C, y_C)$.
De proche en proche, on peut réitérer l'opération pour déterminer les positions de points sur la Terre, seulement grâce à des mesures d'angles.

> *Remarque*
> *Pour commencer le processus, il faut tout de même partir de deux points dont on connaît les positions. Cela se fait grâce à des observations astronomiques (cf. p. 26).*

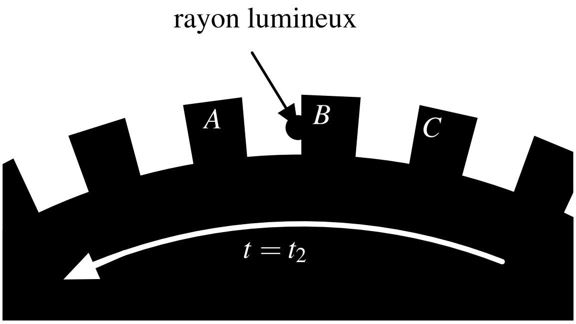
Une explication de l'expérience

Une explication de l'expérience

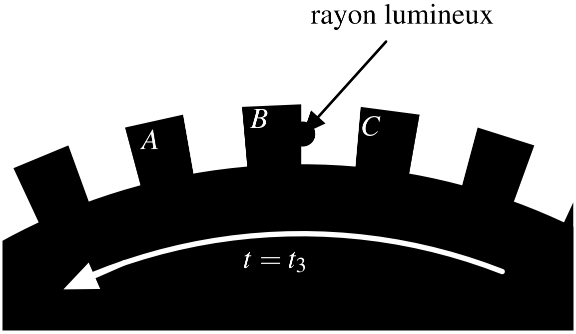
À Suresnes, une source de lumière $\mathscr{S}$ émet un fin pinceau lumineux (grâce à un système de lentilles non représenté) qui se réfléchit sur une lame de verre $\mathscr{L}$ avant de passer entre les échancrures d'une roue dentée $\mathscr{R}$. Le faisceau lumineux se propage jusqu'à Montmartre où un miroir $\mathscr{M}$ le renvoie en sens inverse. Arrivé à Suresnes, le rayon est observé (par l'œil $\mathscr{O}$) à travers la lame $\mathscr{L}$ quand il passe entre les dents de la roue $\mathscr{R}$.



En assimilant le faisceau lumineux à un simple rayon, celui-ci apparaît ponctuellement dans le plan de la roue dentée $\mathscr{R}$ qui tourne.
À la date t_1, le rayon lumineux apparaît dans l'échancrure entre les dents A et B.



À la date t_2, le rayon lumineux disparaît derrière la dent B.
La durée de l'émission de la lumière entre deux dents successives est $\Delta t' = t_2 - t_1$.



À la date t_3, le rayon lumineux apparaît à nouveau, cette fois dans l'échancrure entre les dents B et C.
Puisque les dents sont aussi larges que les échancrures qui les séparent, la durée d'occultation pendant laquelle on ne peut observer de lumière est aussi $\Delta t' = t_3 - t_2$.

La roue dentée comporte $\underline{N = 720}$ dents. Sa fréquence de rotation est $f = 1/T$ où la période de rotation est $T = 2N\Delta t'$. Ainsi,

$$(1) \quad \Delta t' = \frac{1}{2Nf}$$