

AVEC NOS ÉLÈVES

Mesure de la vitesse de la lumière

René Cavaroz, Anne Piet, Chloé, Alexandre et Antoine,
Lycée Salvador Allende, Hérouville-Saint-Clair

Résumé : *La vitesse de la lumière est-elle « instantanée » ou « successive » ? La question est très ancienne mais la réponse est venue tardivement. Après Galilée, Rømer, Fizeau et Foucault, nous avons mené une expérience permettant de retrouver la vitesse de la lumière, en nous inspirant de la méthode dite du « hacheur », s'apparentant à la roue dentée d'Hippolyte Fizeau.*

Un peu d'histoire...

La vitesse de la lumière est si grande (près de **299 792 458 mètres par seconde !**) que dans les conditions d'observation ordinaires, la durée de propagation de la lumière échappe totalement à nos sens. De l'Antiquité¹ jusqu'au XVII^e siècle, la plupart des savants, Descartes en tête, considèrent que la vitesse de la lumière est instantanée. Pourtant, un marginal d'importance, Huyghens, qui est le premier à développer une théorie ondulatoire de la lumière, pense le contraire. La réponse, qui va rapidement être donnée, d'abord par les astronomes puis par les physiciens, lui donnera raison.

En janvier 1610, Galilée découvre les quatre premiers satellites de Jupiter. Ils deviennent aussitôt l'objet de nombreuses observations à travers toute l'Europe. En 1676, Rømer, venu du Danemark à l'Observatoire de Paris, interprète les avances et les retards des occultations des satellites galiléens par Jupiter comme étant dus aux variations de la distance entre Jupiter et la Terre. Pour Rømer, la vitesse de la lumière est certes très grande mais elle est finie. Cinquante ans plus tard, un autre astronome, Bradley, découvre l'aberration annuelle des étoiles. Il confirme ainsi de manière éclatante la découverte de Rømer. Il faudra attendre le milieu du XIX^e siècle pour que deux physiciens, travaillant à l'Observatoire de Paris, mesurent la vitesse de la lumière. L'un, Fizeau, la mesurera « au sol » entre Suresnes et Montmartre, au moyen d'une roue dentée tournant rapidement, l'autre,

Foucault, en laboratoire, au moyen d'un miroir tournant. Les mesures de Foucault, débouchent sur une valeur excellente.

XXI^e siècle : notre expérience

L'expérience que nous allons présenter s'apparente beaucoup à celle d'Hippolyte Fizeau. En effet, le principe y est similaire. Cependant, les instruments dont nous disposons pour mettre en place cette expérience sont nettement plus élaborés, et plus accessibles que ceux de Fizeau à son époque.

Notre expérience s'inspire de celle de la roue dentée, adaptée à notre époque grâce aux nouvelles possibilités techniques dont nous disposons. On remarque notamment que certains inconvénients de l'époque de Fizeau ne sont plus problématiques aujourd'hui. Par exemple, il lui était difficile de maintenir la vitesse de rotation de la roue dentée constante, alors que de nos jours un générateur haute fréquence monté dans un circuit électronique permet le découpage du rayon laser à intervalles de temps réguliers. De plus la vitesse de découpage du hacheur est considérablement plus élevée ce qui permet une réduction du parcours du faisceau lumineux et met l'expérience à la portée d'un lycéen.

Nous mettons en parallèle *Tableau 1* ces deux expériences et en faisons ressortir les similitudes et les différences.

¹ où seul Empodocle d'Agrigente semble se singulariser

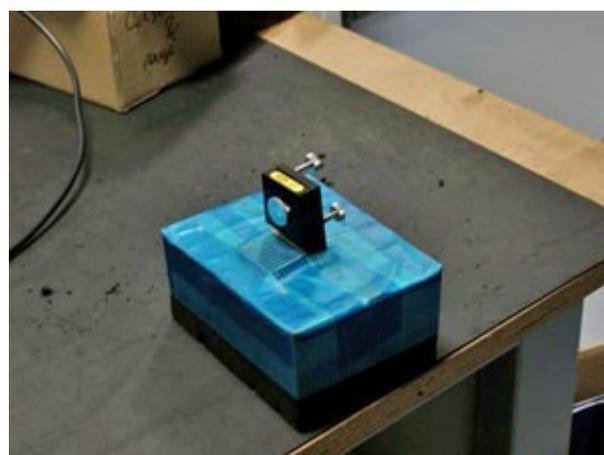
Fizeau et l'expérience de la roue dentée en 1849.	Trois lycéens et l'expérience du hacheur en 2003.
Une roue dentée de 720 dents et 720 échancrures (1440 intervalles dent/creux) qui coupent le faisceau lumineux.	Un hacheur composé d'un cristal d'oxyde de tellure qui diffracte et coupe le faisceau produit par le laser.
La vitesse de rotation de la roue dentée a un minimum de 12 tours par seconde.	Le hacheur découpe le rayon du laser à une fréquence variable grâce au générateur de fréquences.
La distance efficace de parcours du faisceau lumineux est d'environ 17 km.	La distance du parcours du rayon laser est adaptée à la fréquence de hachage du faisceau (pour nous, elle est d'environ 37.5 m).
La source lumineuse est une lampe à « gaz oxygène et hydrogène ».	La source lumineuse est un laser rouge ($\lambda = 633 \text{ nm}$) ou un laser vert ($\lambda = 547 \text{ nm}$).
La surface réfléchissante est un miroir.	La surface réfléchissante est un miroir.
Le moteur entraînant la roue dentée est capable de tourner à très grande vitesse (système de poids et d'engrenages).	Un générateur haute fréquence permet un découpage du rayon laser à intervalles de temps réguliers.

Tableau 1 : comparaison des expériences du hacheur de Fizeau (1849) et de la nôtre (2003).

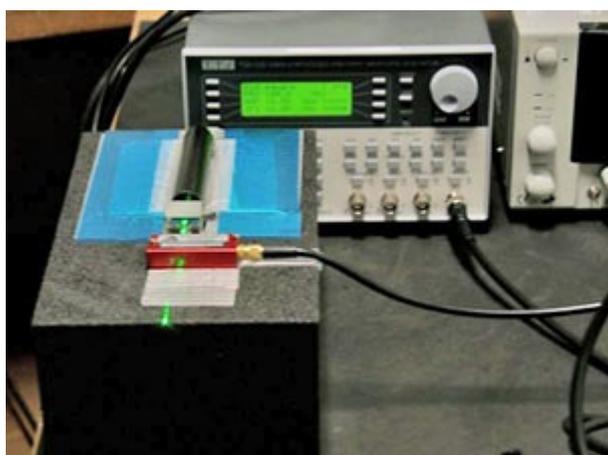
Présentation du matériel



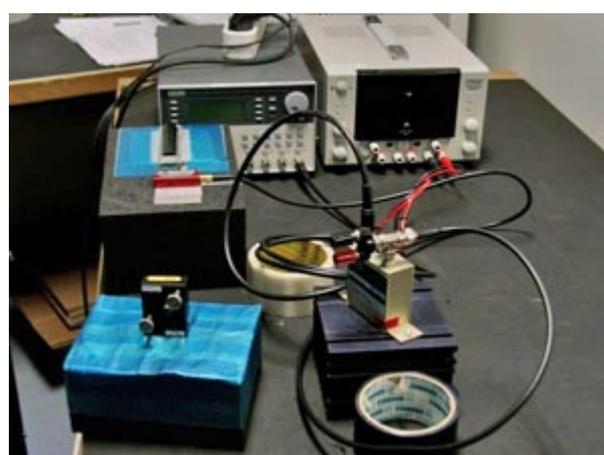
De haut en bas : laser YAG (574 nm), cube séparateur de lumière hacheur ou déflecteur acousto-optique (cristal d'oxyde de Tellure)



Support du miroir



Générateur de fréquence : 0-10 MHz



Alimentation 24V

Figure 1 : Matériel utilisé

Principe du dispositif

Le hacheur, utilisé en guise de roue dentée, coupe le rayon lumineux avec une fréquence déterminée par le générateur haute fréquence. Le cristal d'oxyde de tellure situé dans le hacheur

diffracte le rayon comme le ferait un réseau. On voit apparaître sur le miroir un spot direct (point de lumière) et plusieurs spots diffractés clignotants (cf. photo).

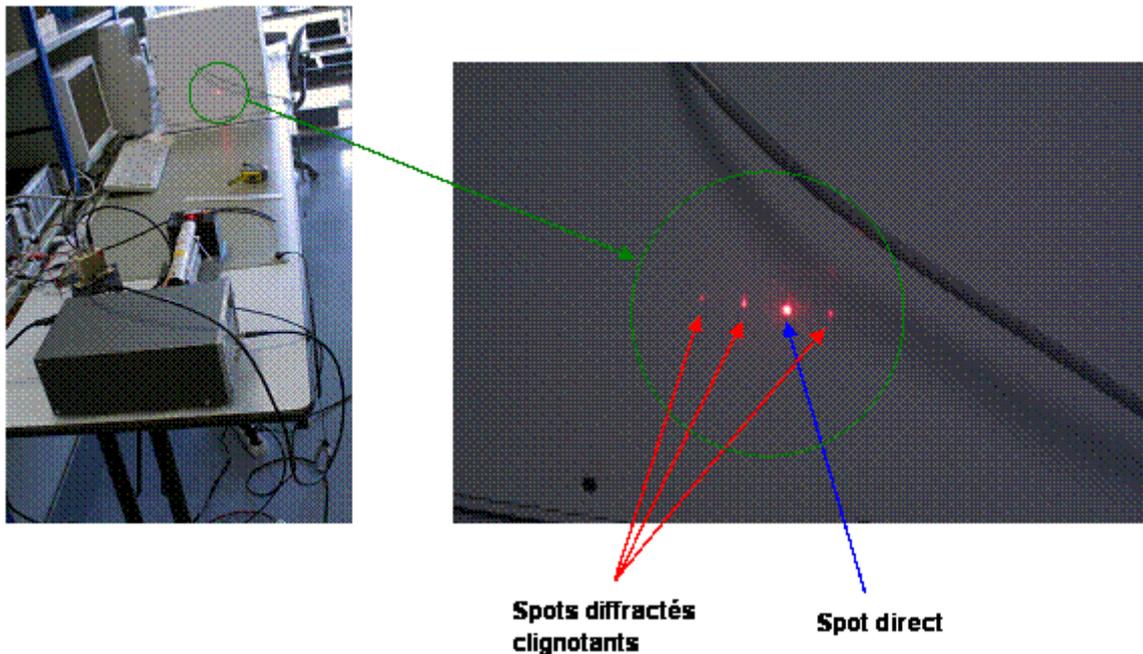


Figure 2 : Montage (gauche) et observations (droite)

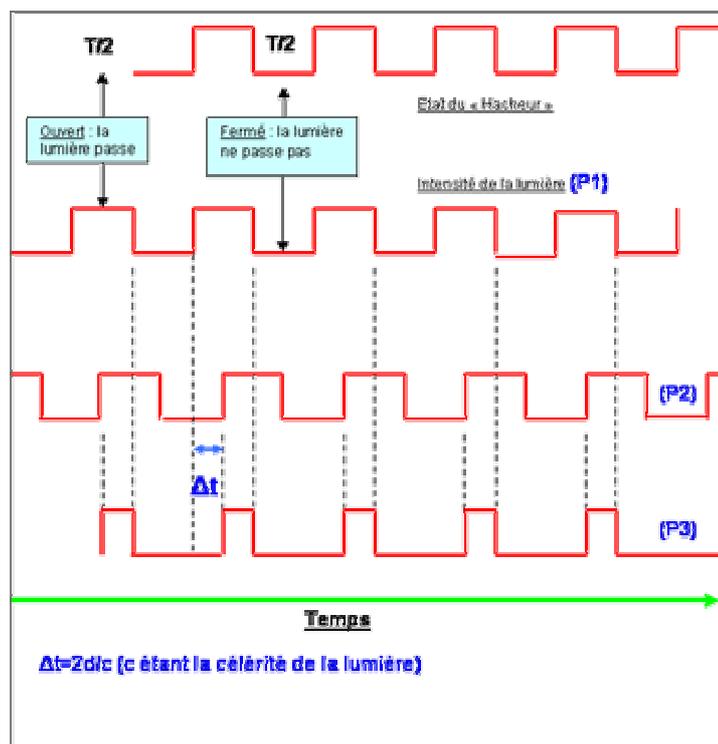
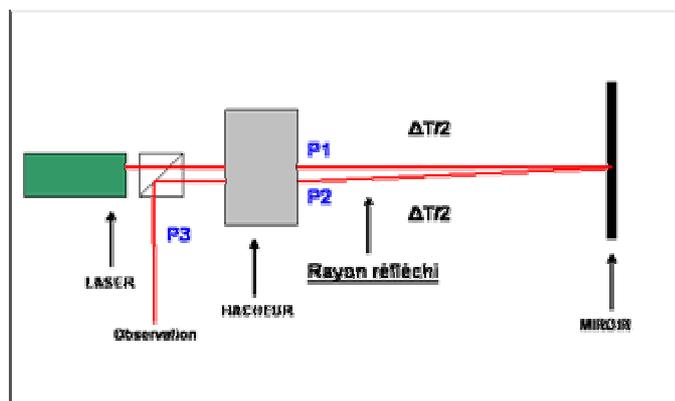


Figure 3 (ci-contre) : état du hacheur
 P1 : Intensité du faisceau lumineux sortant du hacheur à l'aller
 P2 : Intensité du courant arrivant dans le hacheur au retour
 P3 : Intensité observée

Figure 4 (ci-dessous) : Principe optique



Le faisceau lumineux généré par le laser passe dans le hacheur où il est diffracté puis va se réfléchir sur le miroir. On renvoie l'un des rayons diffractés clignotant dans le hacheur. L'aller-retour hacheur-miroir-hacheur est la distance $2d$. Elle est valable si et seulement si le hacheur est en position ouverte (il laisse passer la lumière) à l'aller et au retour. Le cycle ouvert fermé correspond à la période T . La période T varie en fonction de la fréquence F (grâce au générateur de fréquence) selon la formule $F = 1/T$. Un cube séparateur est inséré après alignement afin de pouvoir projeter le faisceau retour sur un écran (drap...) et observer la fréquence «d'éclipse».

Pour un minimum de lumière, soit pour $\Delta t = T/2$, on aura une éclipse et la lumière ne passera plus du tout. On a donc les formules suivantes :

$$\Delta t = \frac{2D}{c} = \frac{T}{2}$$

$$c = \frac{4D}{T} = 4DF$$

Pour un maximum de lumière, soit $\Delta t = T$, la lumière passera entièrement. On a donc les formules suivantes :

$$\Delta t = \frac{2D}{c} = T$$

$$c = \frac{2D}{T} = 2DF$$

Pour trouver à quelle distance il faut se placer pour avoir une éclipse, on effectue le calcul suivant :

- on sait que la fréquence est de 2MHz.
- on sait d'après les estimations d'autres scientifiques que la célérité de la lumière est d'environ $3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

$$D = \frac{c}{4F} = \frac{3 \times 10^8}{8 \times 10^8} = 37.5 \text{ m}$$

Déroulement de l'expérience

On effectue nos mesures pour un minimum de lumière donc pour une éclipse. Afin de disposer d'une distance suffisante pour observer une éclipse à une fréquence inférieure à 5MHz (limite d'efficacité du hacheur), nous avons placé l'assemblage de mesure dans le salon de nos parents et le miroir dans le jardin de notre voisin.

La distance hacheur-miroir, mesurée avec un décamètre était approximativement de 31m. L'alignement du faisceau de retour sur l'entrée du hacheur (quelques mm) a été la tâche la plus difficile.

Nous avons observé une éclipse vers la fréquence de 2,5MHz.

Ce qui donne pour la vitesse de la lumière :

$$C = 4DF = 3.1 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Nous obtenons donc une valeur du même ordre de grandeur que Fizeau mais avec une distance beaucoup plus faible.

Source d'erreurs et améliorations

Les sources d'erreurs de notre expérience sont :

- L'incertitude sur la mesure de la longueur D que nous estimons à 60cm soit 2%.
- L'incertitude sur la détection du minimum (cette détection a été faite à l'œil) que nous estimons à 200kHz soit 8%.

L'erreur sur notre mesure est donc dans l'état actuel de 10%. Voici les améliorations à envisager pour obtenir une valeur plus précise :

- Améliorer la méthode de réglage et d'alignement du miroir qui est très pénible
- Pour ce qui est de la mesure de la distance, nous estimons qu'elle peut être faite beaucoup plus précisément (10 cm d'erreur sur 31 m, soit 0.3%).
- Pour ce qui est de la détermination précise du minimum, il faut envisager de placer un détecteur (photodiode ?) au niveau de la tache diffractée de retour et de tracer la courbe Intensité en fonction de la fréquence du hacheur. Cela devrait permettre de déterminer la fréquence à 10 kHz près soit une précision de 0.4%

Il devrait donc être possible de faire une mesure avec une incertitude de 0.7%.



Figure 5 :
Mesure de la distance entre le hacheur et le « miroir » afin de calculer, grâce à la tangente, l'angle de réfraction du faisceau lumineux qui est d'environ 1°