

Mesure grand public de la vitesse de la lumière

par **Christophe BONNET**

Université Claude Bernard Lyon 1 - CNRS - Institut lumière matière (iLM)

UMR 5306 - 69100 Villeurbanne

christophe.bonnet@univ-lyon1.fr

et **Élise CAMUS**

Lycée du Parc des Loges - 91000 Évry

ecamus.enseignement@gmail.com

CET ARTICLE décrit le montage réalisé en 2015 à Lyon, qui permit au grand public de mesurer la vitesse de la lumière, grâce à une expérience inspirée par celles que firent Hippolyte Fizeau en 1849 et Léon Foucault en 1862. Depuis l'esplanade de la colline de Fourvière, un faisceau laser était émis, à l'aide d'un miroir oscillant, en direction de l'hôtel de ville de Vaulx-en-Velin. Là-bas, il était réfléchi et renvoyé vers Fourvière. Durant cet aller-retour long de deux fois 7,63 km, le miroir oscillant pivotait légèrement, si bien que la direction du faisceau réfléchi était décalée spatialement du faisceau incident. La mesure de ce décalage sur un écran, à l'aide d'un double décimètre, a permis à quelques cent quarante habitants de la métropole de Lyon de mesurer la célérité de la lumière. Cette expérience, coorganisée par le planétarium de Vaulx-en-Velin et l'Institut lumière matière (iLM), a été médiatisée et vulgarisée, notamment dans la presse locale. Le présent article en fait une description physique plus avancée, mais néanmoins accessible dès le lycée.

INTRODUCTION

Il y a un peu plus de dix ans, un remarquable faisceau laser tranchait le ciel nocturne de Lyon (cf. figure 1, page ci-après). Des physiciens de l'Institut lumière matière (iLM) de Villeurbanne permettaient au grand public de mesurer la vitesse de la lumière dans l'air. L'expérience reproduit, en la modernisant, celles réalisées par Hippolyte Fizeau [1] et Léon Foucault [2]. Le premier, en 1849, dirige depuis Suresnes un faisceau lumineux collimaté vers un miroir situé à Montmartre, à travers une roue dentée en rotation. La lumière passe entre deux dents, est réfléchie par le miroir, puis revient vers la roue. Lorsque la roue tourne à une vitesse telle qu'une dent occulte le rayon lumineux réfléchi, l'observateur ne voit plus de lumière : c'est l'extinction. Connaissant la distance aller-retour (17,266 km) et la fréquence de rotation pour laquelle la première extinction se produit ($12,6 \text{ tr} \cdot \text{s}^{-1}$), Fizeau en déduit le temps de parcours et donc la vitesse de la lumière ($3,15 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$). Le second, en 1862, utilisera un miroir

tournant pour estimer la vitesse de la lumière à l'Observatoire de Paris avec une plus grande précision (298 000 km/s).

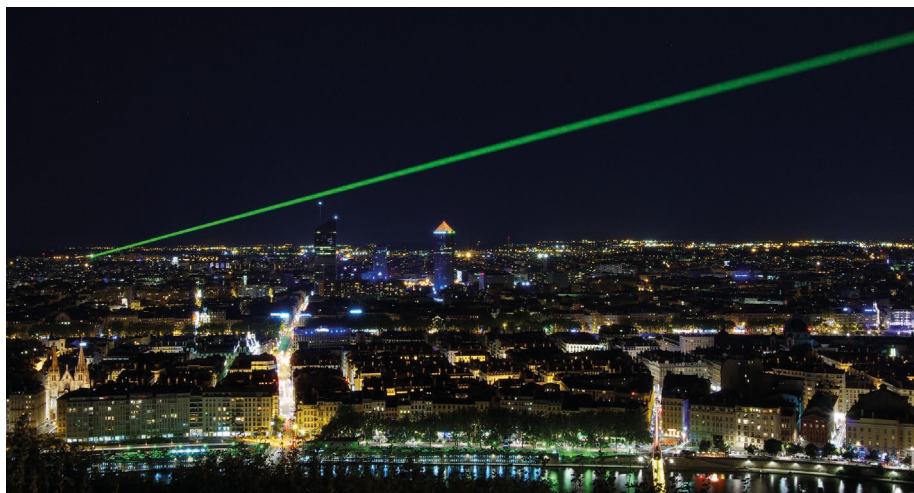


Figure 1 - Tir laser traversant le ciel de la métropole de Lyon entre l'esplanade de Fourvière et l'hôtel de ville de Vaulx-en-Velin en septembre 2015.

L'expérience réalisée à Lyon conserve ce principe, mais utilise respectivement un miroir oscillant et un laser à la place d'une roue dentée et d'une lampe. Elle fut développée en 2015, année internationale de la lumière et des technologies fondées sur la lumière, et à l'occasion des vingt ans du planétarium de Vaulx-en-Velin.

Dans le même but, une précédente expérience avait déjà été réalisée en 2006 avec un laser pulsé nanoseconde, permettant une mesure de la vitesse de la lumière par temps de vol ($\Delta t \sim 50 \mu\text{s}$). Néanmoins, en raison de la dangerosité du laser utilisé, l'émission et la réception étaient effectuées depuis le toit de l'hôtel de ville de Vaulx-en-Velin. À Vaulx-en-Velin, le grand public avait donc pu regarder l'expérience se dérouler, mais pas directement participer à la mesure. Le montage développé en 2015 pallie cela.

1. PRÉSENTATION D'ENSEMBLE

L'expérience consiste à mesurer la vitesse de la lumière à l'aide d'un faisceau laser émis depuis un module sécurisé installé à Fourvière, en direction d'un coin de cube situé sur le toit de l'hôtel de ville de Vaulx-en-Velin, à 7,63 km de distance. Le faisceau est d'abord élargi, polarisé circulairement, puis se réfléchit sur un miroir oscillant, avant de parcourir l'aller-retour. Le faisceau retour, dont le sens de polarisation diffère de

celui du faisceau aller à cause de la réflexion sur le coin de cube, est isolé et envoyé sur un écran. Durant le laps de temps que dure l'aller-retour du faisceau laser, le miroir oscillant a légèrement pivoté, si bien que la direction du faisceau retour est déviée par rapport à celle du faisceau aller. Ainsi, deux taches lumineuses, dont l'écartement Δd dépend de la vitesse de la lumière c , sont visibles sur l'écran d'observation. Une caméra filme cet écran et projette l'image à l'extérieur, permettant au public de mesurer l'écartement entre les deux taches avec une règle et d'en déduire la valeur de c . Les éléments successifs du dispositif expérimental sont détaillés ci-après et représentés schématiquement sur la figure 2 (cf. pages ci-après).

2. DÉTAIL DU MONTAGE OPTIQUE

2.1. Mise en forme et émission du faisceau depuis Fourvière

L'expérience utilise un laser Verdi polarisé rectilignement d'une puissance de 5 W en continu et de longueur d'onde $\lambda = 532$ nm. Toute la mise en forme du faisceau, l'émission et la réception s'effectuent depuis un module (Algeco) installé sur l'esplanade de Fourvière. L'utilisation d'une pièce fermée est nécessaire pour des raisons de sécurité : en plus des phénomènes de diffusion et de réflexion qui y existent, la taille du faisceau retour (diamètre ~ 1 m) implique que tout l'intérieur du module est illuminé lors de l'expérience. Dans le module (d'accès restreint), le port de lunettes de protection était donc obligatoire, tandis que les visiteurs pouvaient faire leurs mesures en toute sécurité sur l'esplanade. L'expérience a reçu une autorisation préfectorale et une zone d'exclusion aérienne a été mise en place avec la sécurité aérienne.

En sortie du laser, la mise en forme du faisceau est réalisée grâce à une succession d'éléments installés sur une table optique. Premièrement, la direction de polarisation est modifiée avec une lame demi-onde afin de devenir horizontale. Le faisceau passe ensuite à travers un cube séparateur : compte tenu de sa polarisation, le faisceau aller le traverse sans être dévié. Le faisceau est ensuite élargi à l'aide d'un système afocal à deux lentilles $\mathcal{L}_1$ et $\mathcal{L}_2$ de distances focales respectives $f'_1 = 5,0$ cm et $f'_2 = 50$ cm. La lunette ainsi réalisée présente donc un grossissement $G = \frac{f'_2}{f'_1} = 10$. L'intérêt de cet élargissement est double : d'une part, faciliter la collimation du faisceau aller (un faisceau plus large diverge moins) et d'autre part, multiplier par G la déviation angulaire du faisceau retour. La collimation, le filtrage et l'alignement du faisceau sont peaufinés à l'aide de deux diaphragmes placés avant et après $\mathcal{L}_2$. Une lame quart d'onde d'axe réglé à 45° rend ensuite la polarisation du faisceau aller circulaire droite. Enfin, ce dernier arrive sur le miroir oscillant.

Le miroir oscillant piézoélectrique est alimenté par un générateur basse fréquence (GBF). Il oscille selon un angle $\alpha(t)$ variable dans le temps et tel que

$\alpha(t) = \frac{\pi}{4} + \alpha_m \sin(2\pi ft)$, avec une fréquence d'oscillation $f = 860$ Hz et une amplitude $\alpha_m = 0,50$ mrad. À l'aide de miroirs plans, le faisceau est finalement envoyé en direction du toit de l'hôtel de ville de Vaulx-en-Velin, situé à une distance $D = 7,7$ km de Fourvière. Le choix de la valeur de α_m résulte d'un compromis. Pour les participants, il est d'autant plus facile de procéder à la mesure de c que α_m est grand (cf. sous-paragraphe 2.3.3.). Néanmoins, en raison des oscillations du miroir, le faisceau laser effectue un balayage au niveau du toit de l'hôtel de ville de Vaulx-en-Velin, sur une distance environ égale à $2\alpha_m D$. Afin que le faisceau n'illumine que le toit de l'hôtel de ville (et non les habitations adjacentes), α_m ne peut pas être choisi trop grand. Avec les valeurs précédentes, le balayage du faisceau s'étend sur la distance acceptable d'environ 7,7 m.

Le choix de la fréquence est aussi un paramètre crucial, puisqu'une fréquence d'oscillation plus grande implique un déplacement plus rapide du miroir. Cependant, celle-ci est limitée par le système piézoélectrique et son électronique limitant la bande passante en fréquence.

2.2. Réflexion sur l'hôtel de ville de Vaulx-en-Velin

Là-bas, le faisceau arrive sur un coin de cube réfléchissant (catadioptré métallique à trois faces orthogonales). Le faisceau réfléchi est ainsi renvoyé dans la même direction que le faisceau incident, sans qu'un alignement minutieux ne soit nécessaire. Bien que mesurant seulement 5 cm de côté, viser le coin de cube est plutôt facile, puisqu'en raison de la divergence angulaire du faisceau laser, son diamètre au niveau de l'hôtel de ville était de l'ordre de 2 m (cf. sous-paragraphe 2.4.). Par ailleurs, les trois réflexions successives modifient l'état de polarisation du faisceau retour, qui devient circulaire gauche.

2.3. Réception à Fourvière et mesures

2.3.1. Réception du faisceau réfléchi

Le faisceau retour suit dans un premier temps le même trajet que le faisceau aller : réflexion sur le miroir oscillant, passage à travers la lame quart d'onde qui rend le faisceau retour polarisé rectilignement selon une direction verticale et passage à travers la lunette, avant d'arriver sur le cube séparateur. C'est à ce moment-là que les trajets des faisceaux se séparent : compte tenu de la polarisation du faisceau retour, celui-ci est dévié à 90° par le cube séparateur. Finalement, le faisceau arrive sur un écran, situé à une distance totale $L = 3,52$ m du miroir oscillant. Une caméra filme l'écran et l'image est projetée *via* un vidéoprojecteur sur le mur extérieur de l'Algeco, où les visiteurs réalisent les mesures.

L'ensemble du montage est représenté schématiquement sur la figure 2.

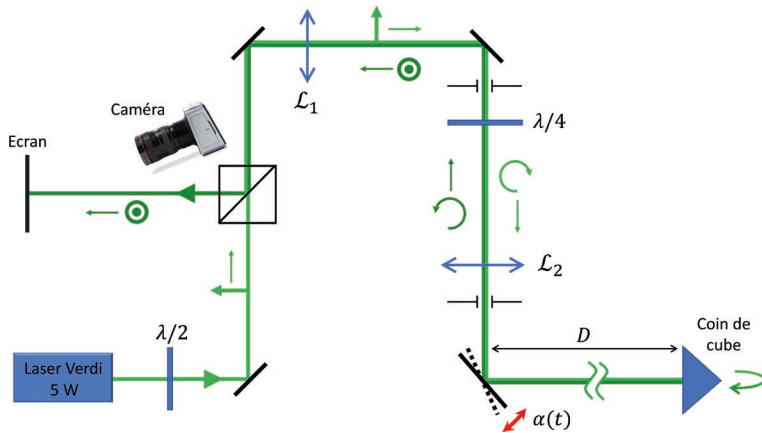


Figure 2 - Schéma du montage optique permettant la mesure de la vitesse de la lumière avec un miroir oscillant. Les petites flèches vertes indiquent l'état de polarisation du faisceau laser à différents endroits, selon le sens aller (vert clair) ou retour (vert foncé).

2.3.2. Exploitation

Durant le trajet aller-retour du faisceau sur une distance $2D$, le miroir oscillant tourne légèrement, passant de l'angle $\alpha(t) = \frac{\pi}{4} + \alpha_m \sin(2\pi ft)$ à l'angle $\alpha + d\alpha$ avec $d\alpha$ un petit angle donné par :

$$d\alpha = \alpha_m 2\pi f \cos(2\pi ft) dt \quad (1)$$

avec $dt = 2D/c$, en assimilant l'air au vide. L'angle $d\alpha$ est bien « petit », puisque la période d'oscillation du miroir vibrant $1/f = 1,2$ ms est très grande devant le temps $dt = 50 \mu s$ que mettent les photons à faire l'aller-retour Fourvière - Vaulx. Ainsi, d'après les lois de la réflexion de Descartes, le miroir oscillant dévie le faisceau retour de l'angle double, $2d\alpha$, par rapport à la direction du faisceau aller (confondu avec l'axe optique). Cet angle est ensuite multiplié par $G = 10$ lors passage à travers la lunette. Puisque les angles mis en jeu sont petits, que la lunette est placée très proche du miroir oscillant, et que l'écran est situé à grande distance L du miroir, on peut alors faire l'approximation que le faisceau retour impacte l'écran à une position :

$$d \approx 2GLd\alpha = 8\pi\alpha_m \frac{f_2'}{f_1} Lf \frac{D}{c} \cos(2\pi ft). \quad (2)$$

Sur l'écran, le faisceau oscille donc entre deux points extrêmes d_+ et d_- , obtenus lorsque $\cos(2\pi ft) = +1$ ou -1 respectivement, espacés d'une distance $\Delta d = d_+ - d_-$ telle que :

$$\Delta d = 16\pi\alpha_m \frac{f_2'}{f_1} Lf \frac{D}{c}. \quad (3)$$

Le balayage n'est bien sûr pas visible à l'œil nu compte tenu de la valeur de f . On pourrait donc s'attendre à observer sur l'écran un segment de lumière de longueur

Δd d'intensité uniforme. Néanmoins, seules deux tâches lumineuses, distantes de Δd , sont visibles (cf. figure 3). En effet, lorsque le miroir oscille, l'alignement du faisceau entre Fourvière et Vaulx-en-Velin n'est réalisé que lorsque le miroir passe par sa position moyenne ($\alpha_0 = \frac{\pi}{4}$), correspondant à sa vitesse de rotation maximale. Au cours du temps, le miroir passe deux fois par cette position par oscillation, une fois dans le sens horaire, puis antihoraire. Ainsi, les deux taches observées correspondent aux déplacements d minimum et maximum.

2.3.3. Mesure par les participants

L'écran est filmé puis projeté sur le mur extérieur avec un grandissement $\gamma = 4$. Les participants pouvaient alors tout simplement mesurer sur l'écran $\Delta d' = \gamma \Delta d$ (de l'ordre de 4 cm) avec un double-décimètre afin d'en déduire la valeur de c à l'aide de la relation finale suivante, issue de la relation (3) établie précédemment :

$$c = 16 \gamma \pi \alpha_m \frac{f_2'}{f_1'} L f \frac{D}{\Delta d'}. \quad (4)$$

Un système d'afficheur numérique indiquait à tout le public la dernière valeur de vitesse mesurée. Cent quarante mesures ont ainsi été réalisées. La valeur moyenne obtenue est de $3,18 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, avec un écart-type de $0,42 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, d'où un intervalle de confiance à 95 % qui vaut $(3,18 \pm 0,07) \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Bien que n'incluant pas la valeur attendue ($2,9972 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), l'expérience reste une prouesse expérimentale. Parmi les causes justifiant l'écart à la valeur attendue, mentionnons par exemple l'approximation ayant consisté à négliger la dimension de la lunette ($f_1' + f_2' = 55 \text{ cm}$) devant la distance $L = 3,52 \text{ m}$ séparant le miroir oscillant de l'écran. Même si elle permet l'établissement de la relation (2) en allégeant notablement les calculs, elle s'avère quelque peu grossière. Par ailleurs, il n'y a pas eu d'estimation rigoureuse de toutes les sources d'erreurs présentes sur les paramètres de la relation (4).

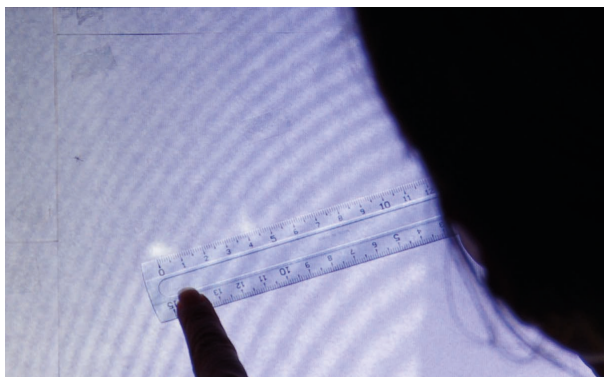


Figure 3 - Mesure de $\Delta d'$ par un participant.

2.4. Intérêts de la source laser

Dans cette expérience, l'utilisation d'un laser, source de lumière particulièrement intense, est un vrai avantage, car une quantité importante de lumière est perdue entre l'émission et la réception du faisceau. Modélisons l'irradiance du faisceau laser utilisé par une distribution gaussienne de *waist* $w_0 \approx 1,1$ mm. Après passage à travers la lunette, la largeur du faisceau devient $w'_0 = 10 w_0 = 11$ mm. Sa longueur de Rayleigh (distance à laquelle la section transversale du faisceau est doublée) est $z_R = \pi w_0'^2 / \lambda = 0,71$ km. Le diamètre attendu du faisceau à Vaulx-en-Velin (distance D) est alors

$$2w(D) = 2w'_0 \sqrt{1 + \left(\frac{D}{z_R}\right)^2} \approx 24 \text{ cm}$$

[3]. En réalité, le faisceau présente un diamètre quasiment dix fois plus grand et un *speckle* important (cf. figure 4), probablement en raison de fortes fluctuations d'indice dans l'air (variation de température, pollution atmosphérique...). Ainsi, le coin de cube, de côté 5 cm, réfléchit en direction de Fourvière moins d'un pour cent de la lumière qui arrive à Vaulx-en-Velin. Le même phénomène se reproduit sur le trajet retour, avec au final une intensité lumineuse sur l'écran d'observation très faible par rapport à l'intensité initiale du faisceau. Malgré cela, la puissance du laser utilisé permet de garantir que la quantité de lumière reçue demeure toujours suffisante, et ce, même en cas de pluie, par exemple, ce qui est un point fondamental pour la bonne tenue de l'expérience. On aperçoit à droite le trépied sur lequel se trouve le coin de cube réfléchissant.

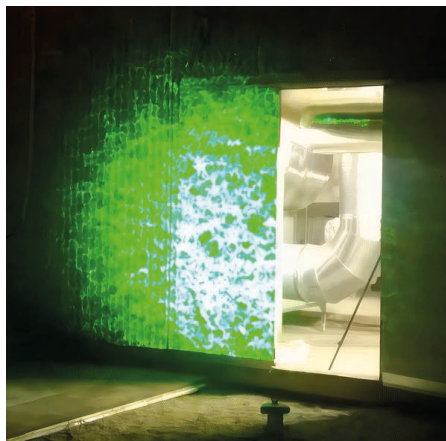


Figure 4 - Faisceau laser sur le toit de l'hôtel de ville de Vaulx-en-Velin.

3. RETOURS DU PUBLIC ET VALORISATION MÉDIATIQUE

Plusieurs tirs laser ont été effectués les 24, 25, 26 et 27 septembre 2015 entre 20h

et minuit. Le faisceau laser, visible à des kilomètres à la ronde, a suscité la curiosité de nombreux Lyonnais, venus échanger avec les chercheurs et enseignants-chercheurs présents. Parmi eux, environ cent quarante personnes, adultes et enfants, ont pu mesurer la vitesse de la lumière dans l'air. Des articles sont parus dans les journaux locaux d'informations (*Le Progrès*, *Grand Lyon Magazine*, *Lyon Capitale*...) ainsi qu'un reportage sur la chaîne de télévision France 3 Auvergne-Rhône-Alpes [4]. Les retours du grand public ont été positifs. Le faisceau laser a souvent été jugé impressionnant de par son diamètre et sa luminosité et beaucoup de questions ont été posées quant à son fonctionnement. Certains participants ont mentionné leur étonnement quant au fait qu'il soit « si facile » de mesurer la valeur de c malgré sa valeur vertigineuse. La participation active du public à la mesure de la vitesse de la lumière a été appréciée, de même que l'engouement, la pédagogie et la disponibilité des scientifiques sur place. L'objectif de réaliser un pont entre le monde de la recherche et les citoyens et citoyennes du secteur a ainsi été atteint.

CONCLUSION

À travers cette version modernisée, relativement simple, mais ambitieuse, de l'expérience historique de Fizeau, l'Institut lumière matière de Lyon et le planétarium de Vaulx-en-Velin ont permis aux habitants de la métropole de Lyon de participer activement à la démarche expérimentale de mesure de la vitesse de la lumière, tout en s'appropriant un morceau d'histoire scientifique, faisant ainsi dialoguer science, histoire et société.

Ce projet fut une réussite aussi bien dans la réalisation expérimentale que dans la transmission des connaissances au grand public. Il démontre que l'investissement dans des structures scientifiques universitaires et éducatives est crucial pour diffuser au sein de la société la compréhension des sciences physiques.

REMERCIEMENTS

Un grand merci aux membres de l'iLM ayant participé à l'installation et l'animation (tout particulièrement à Emmanuel Cottancin, Paolo Maioli, Estelle Salmon, Brigitte Prével et Jérôme Degallais) ainsi qu'à ceux du planétarium de Vaulx-en-Velin (Pierre Henrique et Simon Meyer). Merci aussi aux sociétés Coherent et Piezoconcept (Samuel Choblet) pour avoir prêté respectivement la source laser et le miroir vibrant, sans lesquels cette expérience n'aurait pas pu être réalisée.

BIBLIOGRAPHIE ET NETOGRAPHIE

- [1] H. Fizeau, « Sur une expérience relative à la vitesse de propagation de la lumière », *Revue scientifique et industrielle*, vol. 36, p. 393-396, 1849.

- [2] L. Foucault, «Détermination expérimentale de la vitesse de la lumière : parallaxe du Soleil», *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, vol. 55, p. 501-503, 1862.
- [3] D. Dangoisse, D. Hennequin et V. Zehnlé-Dhaoui, *Les lasers*, Paris : Dunod, 1998.
- [4] C. Banasik et P. Lachaux, «Le planétarium mesure son aura à la vitesse de la lumière», reportage TV France 3 Auvergne-Rhône-Alpes, 2015. Disponible à l'adresse : <https://france3-regions.franceinfo.fr/auvergne-rhone-alpes/le-planetarium-mesure-son-aura-la-vitesse-de-la-lumiere-816841.html> page consultée le 5 juin 2026.

**Christophe BONNET***Maître de conférences*

Université Claude Bernard Lyon 1

CNRS - UMR 5306

iLM (Institut lumière matière)

Villeurbanne (Rhône)

**Élise CAMUS***Professeure agrégée - CPGE MP*

Lycée du Parc des Loges

Évry (Essonne)