

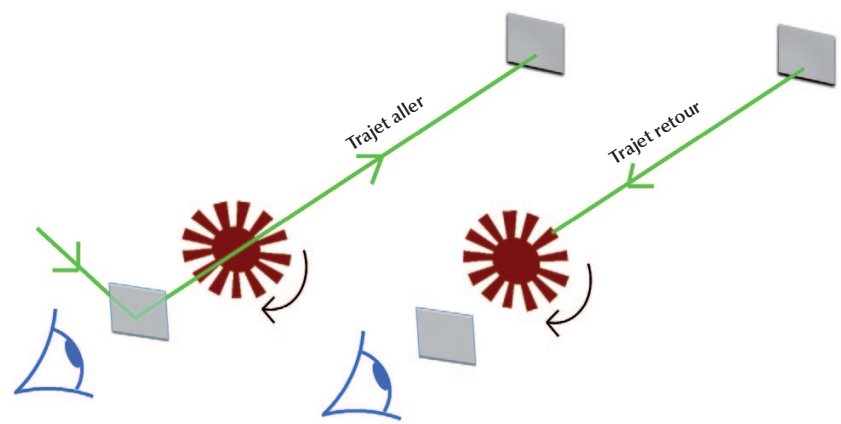
Un Laser sur la Ville

Une version moderne de l'expérience de Fizeau pour les 50 ans du laser

Olivier Morizot, Adrien Sellé, Sandrine Ferri, Didier Guyomarc'h, Jean-Marie Laugier et Martina Knoop (Martina.Knoop@univ-provence.fr)
Université de Provence, Physique des Interactions Ioniques et Moléculaires (UMR 6633),
Centre de St Jérôme - Case C21, 13397 Marseille Cedex 20

Pour le 50^e anniversaire du laser, nous avons envie de faire plus que lui allumer quelques bougies. Pour commencer, faire la publicité du laser auprès du grand public pour fêter son anniversaire dignement, mais aussi et en même temps réaliser une expérience qui puisse attiser l'intérêt des étudiants et chercheurs !

À l'occasion des 50 ans du laser, la section locale « Provence » de la Société Française de Physique a organisé, conjointement avec l'ESUP-Maison des Sciences de l'Université de Provence, une expérience phare portant sur la mesure de la vitesse de la lumière.



1. Principe de l'expérience de Fizeau. La mesure de c est basée sur l'utilisation d'une roue dentée qui laisse passer la lumière à l'aller et la bloque au retour.

À Marseille, nous avons fait le choix de mettre en place une mesure de la vitesse de la lumière c , directement inspirée de la réalisation de nos collègues parisiens lors de l'Année Mondiale de la Physique [1]. Le principe est le même que dans l'expérience réalisée par Hippolyte Fizeau en 1849 entre Montmartre et le mont Valérien à Suresnes, séparés d'une distance d'environ 8,6 km [2]. À l'époque, Fizeau module la lumière émise par une lampe puissante à l'aide d'une roue dentée. La lumière transmise parcourt la distance d la séparant du second site où elle se réfléchit sur un miroir. Fizeau, placé derrière la roue (du côté de la lampe source, fig. 1), n'observe alors plus de signal retour quand la roue tourne à une vitesse pour laquelle, une échancrure laissant passer la lumière à l'aller, la dent qui suit bloque son retour. Le temps de passage d'une échancrure à la dent suivante est alors égal au temps aller-retour de la lumière ; la vitesse v_l de la lumière se déduit donc de la formule $v_l = 2d \times f \times 2n$, où f est la fréquence de rotation de la roue dentée et n le nombre de dents de la roue.

Étant donnée la topologie marseillaise, un seul endroit est suffisamment symbolique, central et largement visible pour nous servir de cible et accueillir le rétro-rélecteur. Nous avons donc installé un ensemble de quatre coins de cube de tailles et qualités différentes sur la Terrasse des Anges, située au sommet de la tour de Notre-Dame de la Garde. L'utilisation de coins de cube comme rétro-rélecteurs fait que l'expérience ne nécessite qu'un alignement grossier et simple à retrouver en cas de problème. Un coin de cube, contrairement à un miroir, renvoie la lumière parallèlement au faisceau incident, minimisant les opérations d'alignement nécessaires. Le laser et la détection étant localisés sur le site universitaire de Saint-Charles, le faisceau laser traversait ainsi le centre ville et le Vieux Port de Marseille (fig. 2). Le faisceau laser parcourt alors une distance $2d = 4846,35$ m, mesurée à trois centimètres près par une équipe d'élèves de l'École Nationale des Sciences Géographiques dans le cadre d'un projet d'études⁽¹⁾.

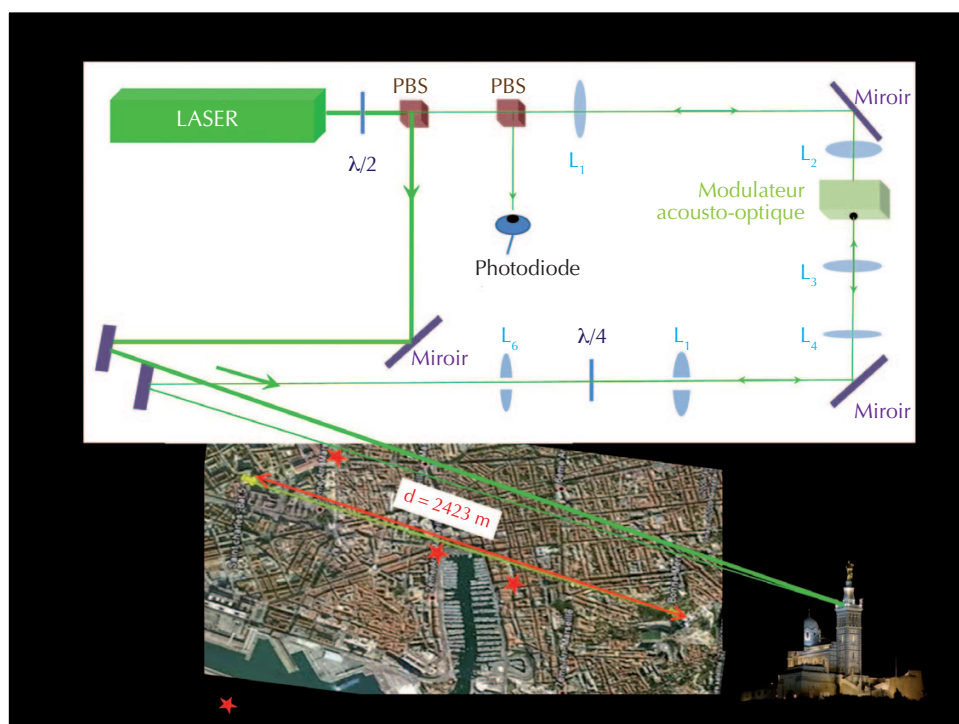
(1) La mesure de la distance entre la basilique et l'université a été effectuée par télémétrie laser, à l'aide du matériel le plus performant de l'IGN. Puis la longueur exacte du trajet de la lumière dans la salle d'expérience a été retracée par triangulation, de manière à obtenir une précision sur la distance ne limitant pas nos mesures ultérieures.

© Laurence Chergier-Kovacic



Arrivée du faisceau à Notre-Dame de la Garde. Le diamètre du faisceau sur la tour est de 2,5 m environ (pour 2 mm au départ) ! – 4 juin 2010.

Le montage expérimental est présenté sur la figure 2. Le faisceau laser est immédiatement coupé en deux voies de puissances ajustables. La polarisation de l'onde incidente est tournée par une lame demi-onde ($\lambda/2$) afin de jouer sur le quotient des contributions s et p , qui seront ensuite séparées par un premier cube séparateur de polarisation (PBS). Ainsi, dans le but de protéger nos optiques tout en conservant le caractère spectaculaire de l'expérience, nous avons envoyé simultanément deux faisceaux presque superposés au-dessus de Marseille et issus du même laser : un faisceau très faible de « mesure » (faisceau transmis par le PBS), et un faisceau puissant (jusqu'à 9 W) présent uniquement pour le « spectacle » et dont nous n'observons pas le retour (faisceau réfléchi par le PBS). Cette option est d'autant plus justifiée qu'avec de bonnes optiques et un alignement précis du montage, le signal retour peut être détecté à partir d'une centaine de mW seulement de puissance dans la voie de mesure.



2. Montage expérimental avec deux faisceaux laser traversant le centre ville de Marseille. Différents éléments optiques servent à renvoyer, séparer ou adapter les faisceaux laser (L : lentille ; PBS : cube séparateur de polarisation ; $\lambda/2$, $\lambda/4$: lames à retard).

Pour l'obturation rapide de la lumière, en guise de roue dentée, nous avons utilisé un modulateur acousto-optique (MAO). Cet élément, lorsqu'il est alimenté, permet de diffracter la lumière en plusieurs ordres bien séparés et, dans notre cas, d'obtenir un maximum de luminosité dans l'ordre 1 de diffraction. Par ailleurs, la lumière diffractée dans cet ordre 1 peut être complètement éteinte, simplement en éteignant le MAO, et ceci à des fréquences plus

élevées que tout interrupteur mécanique (typiquement quelques MHz). Cet ordre 1 est donc aligné avec l'axe optique du montage et se propage jusqu'au sommet de la basilique. À son retour, si le MAO est allumé la lumière sera diffractée à nouveau et déviée de manière à atteindre le détecteur (photodiode). Par contre, si le MAO est éteint, la lumière continue son trajet vers un écran opaque et le détecteur ne détecte aucun signal. Cette solution simple à

>>>

>>>

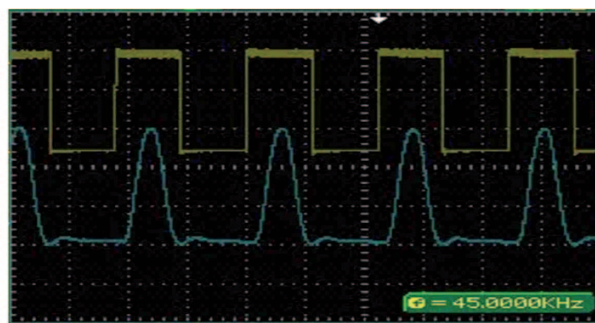
implémenter reproduit l'effet de double hachage que donnait la roue de Fizeau. Pour terminer sur le montage, le reste des optiques permet d'ajuster le diamètre du faisceau. Notamment, les lentilles percées L5 et L6 n'affectent pas le faisceau aller (très fin) mais focalisent le faisceau retour (beaucoup plus large), de manière à ce qu'il passe dans la fenêtre du modulateur.

Un exemple de signal retour est visible sur la figure 3a. La trace jaune correspond au signal de modulation d'amplitude envoyé au MAO et la trace bleue au signal lumineux reçu par la photodiode. Sur la figure 3b est représentée l'amplitude de ce signal retour en fonction de la fréquence de modulation du MAO (multipliée par un facteur 2d). Pour une certaine valeur f_{\min} de cette fréquence, l'amplitude du signal retour est minimale, ce dont on déduit la vitesse locale de propagation de la lumière $v_l = 2d.f_{\min}$, de la même manière que l'avait fait Fizeau.

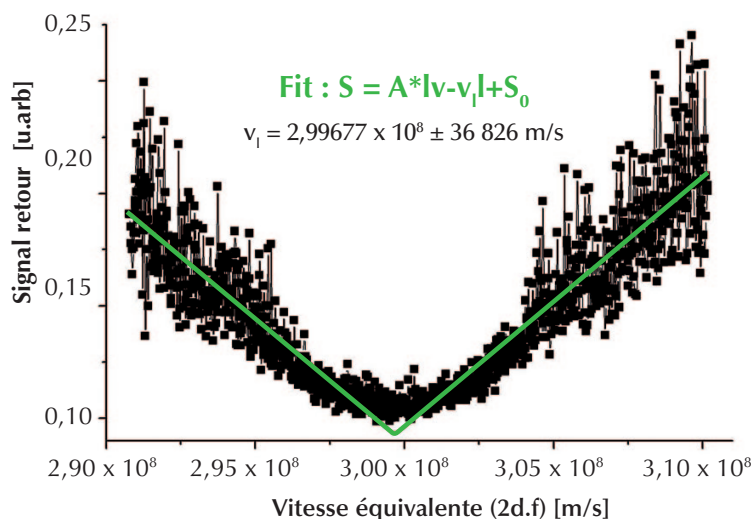
La mesure est entièrement pilotée par une procédure Labview variant progressivement la fréquence de l'AOM (donc de la modulation), tout en acquérant et moyennant le signal de photodiode.

Notre meilleure valeur pour une soirée d'expérience est de $299\,677 \pm 37$ km/s. La précision de la mesure est d'environ 10^{-4} . La figure 3b montre bien que l'incertitude sur cette mesure est essentiellement due à un faible rapport signal sur bruit (lié d'après nos observations aux fluctuations de température, de pression ou de composition de l'atmosphère) et à la réponse temporelle du photodétecteur (qui filtre partiellement les impulsions lumineuses très brèves autour de l'extinction et donne cet aspect arrondi au minimum du signal). Quant à l'exactitude de cette valeur (environ 1.10^{-4}), c'est-à-dire son écart à la valeur théorique de c dans l'air, elle est en grande partie due à notre connaissance imparfaite de l'indice de réfraction de l'air, intégré sur un trajet de presque 5 km en ville et considéré comme étant égal à 1,000275.

En parallèle, nous avons fait plusieurs tentatives pour réaliser l'expérience avec une vraie roue dentée. Outre le problème de la vitesse de rotation assez élevée, ceci pose la question de la stabilité de cette vitesse, de vibrations de l'expérience, et surtout de la lumière diffusée sur la roue dentée perturbant le signal. C'est un chapitre que nous n'avons pas encore complètement clos.



a



b

3. Analyse du signal de retour. (a) Signal de retour pour une fréquence d'AOM qui laisse passer environ la moitié du signal. (b) Représentation de l'amplitude du signal de retour (moyenné sur 100 ms) en fonction de la vitesse « supposée » de la lumière. Les données sont obtenues en faisant varier linéairement la fréquence de l'AOM. Le minimum du signal correspond à la vitesse réelle v_l de propagation de la lumière au-dessus de Marseille.

L'expérience pouvait être suivie sur un blog (www.lasersurmarseille.blogspot.com/). Une chasse aux photos était ouverte aux amateurs sur le site de l'expérience. Surtout, chaque soirée de tir laser, des stands d'explication étaient installés à la gare Saint-Charles et au cours d'Estienne d'Orves, ainsi qu'une tente d'animation sur le Vieux Port. Cette dernière présentait la maquette de l'expérience, des démonstrations ludiques autour du laser, des explications scientifiques et grand public sur son fonctionnement et de magnifiques hologrammes réalisés par plusieurs lasers. Elle était par ailleurs reliée par *webcam* au site de l'expérience. Près de 50 bénévoles, dont beaucoup de doctorants, ont participé à l'expérience, à sa préparation, à la communication et aux animations.

Cette manifestation (juin 2010) était le premier volet de la célébration locale des 50 ans du laser. Elle a été suivie d'une série de conférences « le laser en classe », dans les lycées et collèges de la Région et d'une

grande journée « Laser », le 21 octobre 2010, sur le site Saint-Charles de l'Université de Provence. Cette journée était structurée autour de trois grandes conférences (« Le fonctionnement du laser », « Laser pour la chirurgie ophtalmique » et « Le laser dans la restauration de la pierre »), accompagnées d'ateliers, expériences et animations. ■

Remerciements

Sans matériel – pas de mesure. Nous remercions la société Spectra-Physics pour le prêt d'un laser Millennia 10 W, et tout particulièrement Nicolas Treps pour nous avoir fourni les lentilles percées, mais surtout pour ses précieux conseils ! Nos activités sont soutenues par un grand nombre de partenaires locaux : sans eux, le laser vert n'aurait pas pu briller dans le ciel marseillais. Merci à tous !

Références

1. <http://expositions.obspm.fr/lumiere2005/>, *Bulletin de la SFP* **152** (2005) 32, *idem* **153** (2006) 31.
2. H. Fizeau, « Sur une expérience relative à la vitesse de propagation de la lumière », *C.R. de l'Académie des Sciences*, **T.29** (1849) 90-92.