

Mesurer la vitesse de la lumière « à la Foucault »

Adaptation pédagogique d'une mesure historique

Pierre Lauginie, Groupe d'Histoire et de Diffusion des Sciences d'Orsay

L'auteur nous décrit la réalisation par des étudiants d'une expérience historique.

Contexte historique et pédagogique.

Cet article fait suite à '*La vitesse de la lumière au XIX^e siècle : d'un critère épistémologique à un outil métrologique*', paru dans le numéro 150 des Cahiers Clairaut. Après cet historique des mesures terrestres de la vitesse de la lumière apparues au milieu du siècle, et après avoir souligné l'importance de la mesure de Foucault de 1862, nous abordons maintenant une adaptation pédagogique de cette expérience pour des étudiants d'aujourd'hui.

Cette adaptation s'inscrit dans notre approche expérimentale de l'enseignement de l'histoire des sciences : apporter, via l'adaptation d'expériences « historiques », un support concret ouvrant sur l'histoire des sciences, ou s'intégrant dans un enseignement d'histoire des sciences, sans prétendre, bien entendu, en faire la seule approche possible de l'histoire des sciences. Cette expérience pédagogique s'est développée autour de quelques exemples historiques de physique sur lesquels ont travaillé des étudiants de premier cycle universitaire (aujourd'hui L2), des professeurs de lycées et collèges ainsi que des moniteurs d'enseignement supérieur en stages pédagogiques. Nous traitons donc ici de l'une d'elles : la mesure de la vitesse de la lumière dans l'air par Léon Foucault en 1862 à l'aide du miroir tournant.

Entre réplique stricte et enseignement académique standard.

Ces adaptations pédagogiques d'expériences historiques ne doivent pas être confondues avec le travail de réplique de telles expériences tel qu'il a été mené, par exemple par nos collègues de l'université d'Oldenburg en Allemagne (une réplique = une thèse !)¹, ou par notre collègue

Armand le Noxaïc à Orsay sur des expériences de Pascal². La réplique est un travail de recherche qui vise, à travers la reproduction « à l'identique », à apporter à l'histoire des sciences des éléments qui ne figurent pas dans les documents écrits – en général d'autant plus lacunaires que l'on remonte plus loin dans le passé –, y compris la redécouverte éventuelle du rôle d'anciens « tours de main »³.

Une telle activité de recherche n'est évidemment pas du ressort d'un service d'enseignement de licence. Alors, comment faire ? Accepter un niveau intermédiaire : reproduire en salle des expériences historiques manipulées par les étudiants, avec des contraintes réduites mais en respect complet des concepts originaux. Nous employons le terme « adaptation pédagogique », afin de bien le distinguer de « réplique ».

Qu'entendons-nous par « contraintes réduites » et « respect des concepts » ? Nous n'hésitons pas, par exemple, à utiliser du matériel didactique commercial pourvu que le montage soit « transparent » vis-à-vis de l'original, et naturellement, le document original est fourni pour comparaison. Nous profitons des facilités offertes par les techniques d'aujourd'hui sans mettre en cause l'essentiel. Voyons comment nous y sommes parvenus dans le cas présent. Par rapport à l'expérience de 1862 décrite dans l'article précédent, qu'est-ce qui est conservé et qu'est-ce qui change ?

• *ce qui est conservé* : l'essentiel ! à savoir l'ordre de grandeur des paramètres *physiques* cruciaux :

– la nouvelle distance entre miroirs est de 13 m au lieu de 20 m dans l'original ;

² Le Noxaïc, A., et Lauginie, P., 2010, 'Reconstitution de l'expérience des liqueurs de Blaise Pascal', *Courrier du Centre international Blaise Pascal*, n° 32, 48-55.

³ Voir par exemple : Blondel, C., 1994, 'L'improbable transmission du savoir-faire expérimental', *Pour la science*, n° 202, 10-12.

¹ Voir par exemple : Frerks, J., 2000 'Creativity and Technology in Experimentation: Fizeau's terrestrial Determination of the Speed of Light', *Centaurus*, 42, 249-287.

- la taille du miroir tournant : rectangulaire 8 mm x15 mm, au lieu d'un disque de diamètre 14 mm ;
- la vitesse de rotation peut varier continûment de 0 à 1 300 Hz dans chaque sens. Foucault utilisait 400 Hz et accessoirement 800 Hz ;

• *ce qui change :*

- le faisceau lumineux incident est produit par un petit laser, alors que Foucault utilisait un rayon de soleil piloté par un héliostat ; cela permet aussi d'éliminer le complexe dispositif afocal de Foucault avec 4 miroirs concaves intermédiaires ;
- le miroir tournant est entraîné par un petit moteur électrique au lieu de la turbine à air alimentée par le soufflet d'orgue de Cavaillé-Coll ;
- la vitesse de rotation est affichée directement par le moteur, au lieu de l'horloge stroboscopique construite par Froment.

Ces facilités ne touchent qu'aux aspects accessoires de l'expérience : l'essentiel n'est-il pas qu'un rayon de lumière soit envoyé, que le petit miroir tourne à la bonne vitesse et que le miroir distant soit à bonne distance ? Ainsi, l'expérience est totalement transparente, et les conditions de mesure proches de celles de Foucault, y compris à travers certaines difficultés de réglage.

Le montage utilisé

Principe

Il est similaire à celui de Foucault. Reportons-nous à la figure 1.

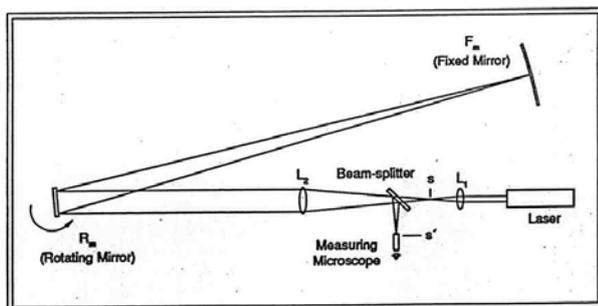


Fig.1. Schéma de principe des expériences de Foucault. Ce schéma est extrait de la notice d'utilisation de l'expérience moderne utilisée en enseignement réalisée par la firme PASCO que nous remercions. Il correspond à la partie supérieure de l'extrait du Recueil de Foucault reproduit Fig. 1 dans l'article précédent du numéro 105 des Cahiers Clairaut.

Un faisceau lumineux fixe est envoyé sur un petit miroir R_m tournant rapidement (de 0 à 1 300 tours par seconde) ; le faisceau réfléchi tombe périodiquement sur un miroir sphérique éloigné F_m , d'où il est renvoyé vers le petit miroir ; pendant l'aller-retour de la lumière entre les deux miroirs, ce dernier a tourné, certes très légèrement, mais suffisamment pour que le faisceau final soit renvoyé, après cette dernière réflexion, dans une direction différent légèrement de la direction

incidente ; de cette déviation, mesurée à l'aide d'un dispositif optique adéquat, on déduit l'angle dont le miroir a tourné pendant l'aller-retour de la lumière ; connaissant la vitesse de rotation, on obtient alors le temps d'aller-retour, d'où la vitesse de la lumière.

Réalisation

La source lumineuse (un laser aujourd'hui) permet d'obtenir, à l'aide d'une première lentille L_1 une tache lumineuse intense S : cette tache sera pour nous la source et nous pouvons oublier ce qu'il y a avant. Une seconde lentille L_2 (focale 25 cm) est disposée de telle façon qu'elle donne de la source S une image éloignée, vers la gauche de la figure. On ne laisse pas cette image se former à gauche : le faisceau est intercepté par le petit miroir R_m , d'abord supposé à l'arrêt ; il est renvoyé vers la droite de manière que l'image se forme exactement sur la surface du miroir sphérique fixe F_m de diamètre 10 cm, faiblement concave, situé à environ 13 m, et tel que son centre de courbure soit situé au centre du miroir R_m . De cette façon, le faisceau est renvoyé exactement selon le chemin inverse, et revient sur la lentille L_2 qui en donnerait une image finale superposée à la source S . Sauf qu'une lame séparatrice intercepte le faisceau et renvoie l'image finale à angle droit en S' où elle peut être observée dans le champ d'un petit microscope.

Lorsque le miroir R_m tourne,

- d'abord, l'image finale S' devient intermittente et son intensité est très affaiblie (d'un facteur de l'ordre de 1 000) car il ne revient d'image, à chaque tour, que pendant la fraction de temps très brève pendant laquelle le faisceau balaye le miroir fixe F_m ⁴. Seule la superposition des impressions visuelles fait apparaître une image permanente.

- ensuite, lorsque le faisceau, réfléchi par F_m , retombe sur le petit miroir R_m ce dernier a tourné – très peu, mais il a tourné ! – pendant le temps d'aller-retour de la lumière. En conséquence, le faisceau finalement renvoyé par R_m n'est plus parallèle à l'axe optique de la lentille et l'image finale ne se forme plus en S' mais en un point légèrement décalé S'' . La mesure consiste à déterminer ce décalage en déplaçant un réticule dans le champ du microscope. Ce déplacement est commandé de l'extérieur par un palmer au 1/100 mm.

⁴ L'utilisation d'un miroir concave ayant son centre de courbure sur R_m a été le facteur déterminant de la réussite de l'expérience de Foucault : au moins, avec cette disposition, l'image revient pendant tout le temps du balayage de F_m . Avec un miroir plan, l'image serait totalement fugitive et l'intensité moyenne bien trop faible.

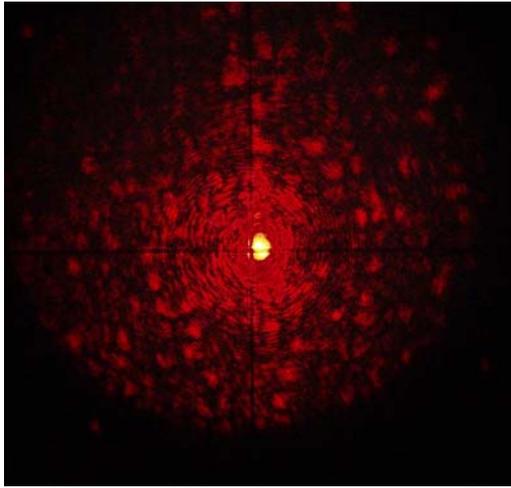


Fig.2. Ce qu'on voit dans le microscope. La photo a été prise miroir arrêté. On notera les traits du réticule. Lorsque le miroir tourne, le spot se déplace dans la direction verticale.

- que voit-on dans le microscope ? Sur la figure 2, on voit le spot au centre de la figure, photographié lorsque le miroir est à l'arrêt. On devine aussi les traits du réticule. Dans ce cas, on doit fortement atténuer l'intensité du faisceau laser par passage entre des filtres polarisants plus ou moins croisés, car l'image n'est pas intermittente et l'intensité totale revient dans l'oculaire⁵. On met le miroir en rotation ; d'abord, on ne voit rien car l'intensité est divisée par 1 000 environ, on décroise les filtres polarisants pour voir quelque chose. Au fur à mesure que la vitesse augmente, on voit le spot se déplacer dans la direction verticale et, à l'aide du palmer, on ramène le trait sur le spot. On lit sur le palmer la position du spot. Pour fixer les idées, pour une variation de vitesse de rotation de 1 000 Hz, le déplacement est de l'ordre de 0,27 mm. On double l'effet en faisant tourner le miroir dans un sens puis dans l'autre, soit un déplacement total d'environ 0,55 mm. La précision sur une mesure unique ne peut donc guère dépasser 2 %, en supposant que tout soit parfait par ailleurs.

Quelles sont les difficultés ?

Elles sont de trois ordres principalement :

1. Réaliser un alignement correct des divers éléments, avec un banc d'optique « didactique » qui n'a rien, vraiment rien, de professionnel : le faisceau doit tomber à peu près au centre du miroir R_m ; on y parvient assez facilement ;
2. Plus difficile : en faisant tourner R_m à la main, amener le spot sur le miroir F_m posé sur une table à 13 m de là ; alors, l'arrêter pour régler l'orientation

⁵ On peut placer une petite camera sur l'oculaire du microscope et renvoyer l'image sur un écran (sécurité laser !). Les « anciens », cependant, préfèrent l'observation directe à l'oculaire (on nous reconnaît à cela !).

de F_m ; pas facile car le mouvement est très fortement démultiplié ; si les niveaux sont mal ajustés, revenir en 1) ;

3. encore plus difficile : le faisceau renvoyé par le miroir F_m doit tomber pile sur le petit miroir R_m , sans toucher les bords ; ajuster l'orientation de F_m à 13 m de distance pour qu'il en soit ainsi : à cet effet, F_m est muni de deux vis micrométriques d'orientation en inclinaison et en azimut. Mais l'opérateur, situé derrière F_m , ne voit pas grand-chose à cette distance. Un aide placé près du petit miroir R_m est bienvenu. Avec de l'entraînement, on finit par y arriver seul, mais sportif ! Si ce réglage est mal fait, même de peu, on aura une tache très déformée et inutilisable. Ensuite, surtout ne toucher à rien !

Conduite et exploitation des mesures

Voir l'encadré pour le passage à la vitesse de la lumière :

$$c \text{ (km} \cdot \text{s}^{-1}\text{)} = 81,2 \Delta N / \Delta s$$

où N est la fréquence de rotation en Hz et Δs le déplacement de l'image en mm.

Au lieu d'une seule mesure, on fait varier N de - 1 300 Hz à + 1 300 Hz par paliers de 100 Hz environ, on relève à chaque fois la position s du spot indiquée par le palmer, et on trace le graphe (figure 3) représentant $k \cdot N$ ($k = 81,2$) en fonction de s : la pente de la droite de régression obtenue est la vitesse de la lumière en km/s. Dans la série représentée, on a obtenu $c = 298\,400$ km/s avec un écart-standard de 0,4 %, (soit +/- 2 400 km/s à 2 écarts-standards). La multiplication des mesures permet ainsi d'aller au-delà des limitations du palmer.

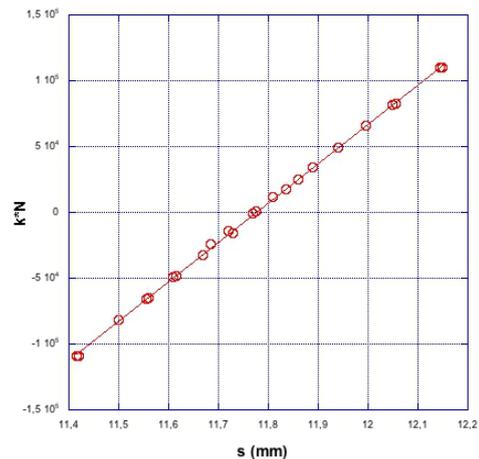


Fig.3. Exemple de résultats. Le graphe représente la fréquence de rotation du miroir, multipliée par le facteur géométrique k (avec $k = 81,2 \text{ m}^2$), en fonction de la position de l'image s en mm, relevée sur le palmer. La pente de la droite de régression linéaire obtenue donne directement la vitesse de la lumière en km/s : ici, 298 400 km/s avec un écart-standard de 0,4 %.

Cependant, la proximité avec la valeur « officielle » ne doit pas faire illusion : les résultats varient de quelques pourcents, avec quelques « pointes » jusqu'à 290 000 ou plus de 310 000, et parfois des séries systématiquement décalées vers le haut (entre 300 000 et 310 000). Le doigté dans la manipulation du palmer est important (toujours tourner dans le même sens, pas de retours arrière !). L'étalonnage de l'affichage de fréquences du moteur mériterait un contrôle. Une petite erreur sur le positionnement de L_2 joue aussi son rôle. La dispersion des résultats d'un expérimentateur à l'autre est nettement supérieure à l'écart-standard obtenu chaque fois par régression linéaire (toujours très bon !), preuve d'erreurs systématiques liées à l'expérimentateur. La qualité du spot – qui est essentielle – dépend de la qualité de l'alignement et surtout de la finesse du réglage micrométrique du miroir F_m (à une dent près !), qui n'est pas toujours au top en conditions réelles d'enseignement. C'est une manip délicate, tout de même ! Mais chacun « sent » vraiment la vitesse de la lumière au bout de ses doigts, ce qui n'est pas rien.

Conclusion

Ces expériences historiques de physique – dont la vitesse de la lumière – ont été proposées dans un cadre pédagogique ouvert, dans lequel les étudiants ont une large initiative⁶. Nous avons voulu réhabiliter des qualités, importantes pour leur formation mais souvent peu mises en valeur : l'observation, l'utilité en sciences d'une certaine habileté manuelle (cela se travaille), la patience, la rigueur, la persévérance, le facteur temps. La difficulté aussi : ces manip sont délicates ; mais pourquoi faire des études « supérieures » si ce n'est pour être confronté à des difficultés et apprendre à les surmonter⁷ ? Nous avons voulu nous rapprocher des conditions réelles de travail en atelier ou en laboratoire : la science en marche n'est pas donnée d'avance – contrairement à une impression souvent ressentie par les élèves – et donc une expérience peut rater, cela arrive et ce n'est pas une catastrophe : l'échec est lui-même formateur. Nous refusons les montages de type « boîte noire » qui ont constitué un véritable fléau pédagogique dans un passé récent. Le montage doit être transparent,

⁶ Nous avons bénéficié d'une liberté pédagogique totale dans le cadre d'une option « Mécanique expérimentale et historique », niveau L_2 . Vincent Ezratti, technicien de formation, est vivement remercié pour son implication dans cet enseignement non conventionnel.

⁷ Voir l'excellent billet de Didier Nordon : 'Le cheval-moteur d'orgueil', in *Pour la Science*, n° 208 (1995).

non seulement au regard de la physique, mais aussi au regard de l'histoire.

Enfin, par la référence à l'Histoire, nous favorisons l'acquisition du réflexe de replacer, pour chacun, son propre travail dans le contexte général scientifique, technique, philosophique, voire social, de son époque. C'est de la culture, tout simplement.

Passage à la vitesse de la lumière

Le déplacement Δs de l'image est proportionnel à la vitesse de rotation du miroir R_m et au temps d'aller-retour de la lumière, donc inversement proportionnel à la vitesse c de la lumière.

La source S est positionnée de façon que S et F_m soient conjuguées par rapport à L_2 . Soit D la distance entre les miroirs, f la distance focale de la lentille L_2 et N la fréquence de rotation du miroir R_m .

Effectuons d'abord un calcul approximatif pour fixer les ordres de grandeur :

– soit Δt le temps mis par la lumière pour faire l'aller-retour entre les deux miroirs. La vitesse de la lumière est : $c = 2D/\Delta t$. Il faut déterminer Δt .

– déterminer Δt : soit α l'angle dont a tourné R_m pendant l'aller-retour de la lumière :

$$\alpha = 2\pi N \Delta t \text{ ou } : \Delta t = \alpha / 2\pi N.$$

Il faut déterminer α .

– déterminer α : en première approximation, le miroir F_m étant « très loin », l'image finale se formera très près du plan focal de L_2 . Le rayon réfléchi aura, lui, tourné de 2α . Si Δs est le déplacement observé,

$$\text{on a } : 2\alpha \approx \Delta s / f.$$

$$\text{D'où finalement } : c = k \Delta N / \Delta s$$

$$\text{avec } k \approx 8\pi f D$$

Avec $D = 13$ m et $f = 0,25$ m, le coefficient k est donc de l'ordre de 82. Cela suffit pour un ordre de grandeur. Si on exprime en Δs mm, on aura directement c en km/s.

Voyons voir : en faisant varier N de $-1\ 000$ Hz à $+1\ 000$ Hz, soit $\Delta N = 2\ 000$ Hz, et sachant que l'on observe alors un Δs d'environ 0,55 mm, on obtient pour c un peu moins de 300 000 km/s. Tout va bien !

En tenant compte de la distance finie entre les miroirs pour le calcul de α et en utilisant les relations de conjugaison, on obtient pour k la valeur plus précise 81,2.

C'est celle qui est utilisée :

$$c \text{ (km} \cdot \text{s}^{-1}\text{)} = 81,2 \Delta N / \Delta s$$

avec ΔN en Hz et Δs en mm.

Sur le site du CLEA vous trouverez une réplique par la même équipe de l'expérience air-eau réalisée en 1850 par Foucault. ■

HISTOIRE

Mesurer la vitesse de la lumière « à la Foucault »

Adaptation pédagogique d'une mesure historique

Pierre Lauginie, Groupe d'Histoire et de Diffusion des Sciences d'Orsay

Et si on refaisait l'expérience air-eau de 1850 ? *Nous l'avons fait !*

Bien entendu, nous avons en tête de refaire un jour, avec ce matériel, la comparaison des vitesses de la lumière dans l'air et dans l'eau, réalisée par Foucault en 1850. Une fois la mesure dans l'air bien rodée, il *suffisait* de recommencer en intercalant un tube d'eau entre les deux miroirs. Facile à dire !

L'expérience – très bricolée – a été tentée dans le cadre d'un enseignement optionnel avec deux étudiants et l'aide d'un technicien. Un tube de PVC qualité construction de 4 m de long et 10 cm de diamètre a été utilisé, après une tentative infructueuse avec un tube de 8 m. Le tube a été fermé aux deux extrémités par des lames à faces parallèles ajustées et collées dans des bouchons standards vissant de PVC évidés. Une culotte en Y permettait le remplissage. Quelles difficultés ?

– un tel tube de PVC de 4 m rempli d'eau, c'est lourd et extraordinairement mou ! Très difficile de l'aligner correctement – une vraie gageure – avec des supports de fortune, sans que le spot aille se perdre sur les parois.

– 4 mètres d'eau, c'est extraordinairement absorbant. Le spot est à peine décelable, parfois pas du tout. Il faut attendre (longtemps !) pour que le liquide soit parfaitement calme. Nous avons vérifié à cette occasion ce qu'avait signalé Foucault en 1850 : l'eau ordinaire (de source ou du robinet) est bien meilleure que l'eau distillée, propice au développement de bactéries et ferments divers !

– au bout du compte, on parvient, après de longs efforts, à renvoyer un spot très affaibli, quasi évanescent, sur le miroir tournant. Et on ne voit rien dans le microscope. Déception ! Les étudiants doivent partir, après une journée chargée.

– bien après le départ de tout le monde, l'auteur (P.L.) réussit en utilisant une technique de détection synchrone. L'image cherchée est en réalité noyée dans le bruit de « speckles » dans le champ du microscope. Il interrompt alors périodiquement avec la main le faisceau incident. Et, miracle ! un petit point – nous dirions un « pixel » – clignote faiblement dans le champ du microscope en phase avec le mouvement de la main. C'est l'image cherchée ! La vitesse du miroir était de 1 000 tours par seconde, et le déplacement de l'image, effectivement plus grand que dans l'air à la même vitesse, était compatible en ordre de grandeur avec un indice de l'eau de 1,33.

C'était la fin de la session d'enseignement et l'expérience n'a pas été reprise ensuite, juste un premier essai « pour voir », mais un essai lourd ! Il faut dire que cette expérience se rapproche davantage d'une réplique que d'une adaptation pédagogique, et demanderait des moyens spécifiques. L'auteur-expérimentateur a été le seul témoin du résultat. Elle ne satisfait donc pas aux critères d'une expérience scientifique publiable (reproductibilité, contrôle des tiers). Néanmoins, nous avons plaisir à donner aux Cahiers Clairaut la primeur de cette histoire. Avis aux amateurs !