

ARTICLE DE FOND

La vitesse de la lumière au XIX^e siècle D'un critère épistémologique à un outil métrologique

Pierre LAUGINIE, Groupe d'Histoire et de Diffusion des sciences d'Orsay (GHDSO), pierre.lauginie@u-psud.fr

Cet article décrit une page d'histoire portant sur la détermination de la véritable nature de la lumière (onde ou corpuscules) et sur l'expérience cruciale qui devait trancher définitivement la question. Il explique également pourquoi, une connaissance précise de la vitesse de la lumière, présentait beaucoup d'intérêt pour obtenir une mesure exacte de la distance entre la Terre et le Soleil qui définit l'Unité Astronomique.

Le point sur la vitesse de la lumière au début du XIX^e siècle

Au milieu du XVIII^e siècle, la finitude de la vitesse de la lumière est définitivement acquise et sa valeur, uniquement déduite d'observations astronomiques, est déjà centrée sur la valeur moderne – 300 000 km/s environ. Mais cette valeur n'est l'objet d'aucune spéculation théorique et n'a évidemment aucune application. Sur ce sujet, il ne se passera rien de fondamentalement nouveau avant un siècle, sinon une amélioration de la précision des observations.

Un siècle plus tard, grâce à la possibilité nouvelle de mesures terrestres directes, la mesure de la vitesse de la lumière va trouver une motivation dans deux directions. Sous l'impulsion d'Arago, deux types d'expériences vont se développer avec des finalités très différentes : théorique ou épistémologique d'une part, métrologique d'autre part.

La nature de la lumière : une expérience « cruciale » ?

Le débat sur la *nature de la lumière*, relancé au début du XVII^e siècle par Descartes, se cristallise avec Newton et Huygens : ou bien une émission de corpuscules, ou bien une « onde » dans un « éther » sur le modèle de l'onde sonore, que propose Huygens.

Après la prééminence du modèle corpusculaire au XVIII^e siècle, la première moitié du XIX^e est dominée par l'irrésistible montée en puissance du modèle ondulatoire avec Young, Fresnel et Arago notamment. En 1840, le sort du modèle corpusculaire est virtuellement réglé. Néanmoins, conscient du fait que les progrès technologiques vont permettre des mesures sur Terre et non plus seulement à partir d'observations astronomiques, Arago croit pouvoir proposer une expérience « cruciale » pour départager les deux modèles :

– le modèle corpusculaire – dit « modèle de l'émission » – tel que conçu à l'époque, prévoit que la vitesse de la lumière doit être plus grande dans l'eau que dans l'air ;

– le modèle ondulatoire prévoit l'inverse.

Faisons donc l'expérience et – croit-on – la question sera réglée ! Citons Arago, en 1838¹³ :

L'image supérieure est-elle moins avancée que celle d'en-bas ? Paraît-elle à sa gauche ? La lumière est un corps.

Le contraire a-t-il lieu ? L'image supérieure se montre-t-elle à droite ? La lumière est une ondulation !

Il faudra douze ans avant que Léon Foucault et Hippolyte Fizeau, utilisant un dispositif à miroir tournant, d'abord ensemble puis séparément, réussissent en 1850 une comparaison *qualitative* des vitesses dans l'air et dans l'eau. Foucault arrivera le premier : la lumière *ralentit* en entrant dans l'eau¹⁴.

Le dispositif de Foucault

Comment a-t-il fait ? Le principe de l'expérience est décrit dans la figure 1 : il s'agit de transformer une durée – le temps d'aller-retour de la lumière entre deux miroirs – en un déplacement spatial observable. Son dispositif comprend principalement deux miroirs éloignés, dont l'un tourne à plusieurs centaines de tours par seconde, un tour de force mécanique. Il peut visualiser, via le déplacement d'une image, le temps mis par la lumière pour faire l'aller-retour entre les deux miroirs.

Foucault utilise un montage à deux faisceaux, dont l'un traverse un tube d'eau alors que l'autre voyage uniquement dans l'air (fig. 1). Le miroir tournant est entraîné par une petite turbine coaxiale issue d'une sirène de Cagniard-Latour. La turbine est alimentée par de la vapeur d'eau surchauffée sous une

¹³ Arago, F. (1838), *C.R. hebd. Acad. Sci.*, 7, 954-965.

¹⁴ Foucault, L. (1854), *Ann. De Chim. et de Phys.*, 3^e série, t. XLI, 129-164.

pression d'une demi atmosphère environ. Le parfait équilibre du miroir (alignement de l'axe de rotation et de l'axe principal d'inertie) est critique, sous peine de voir le dispositif éclater aux vitesses utilisées. L'expérience est strictement qualitative, on ne mesure pas la vitesse absolue de la lumière. Si Foucault compare le son émis par la sirène à celui d'un diapason à 400 Hz, c'est uniquement pour se rendre compte de la vitesse obtenue – une nécessité technique – mais cette vitesse n'entre en rien dans son résultat. À notre avis, le choix par Foucault d'un entraînement pneumatique du miroir – en comparaison du lourd système d'horlogerie à poids de Fizeau – a été un facteur décisif de succès.

Résultat : l'image correspondant au faisceau ayant voyagé dans l'eau est davantage déplacée (fig. 1), la lumière a mis plus de temps, sa vitesse est donc plus petite dans l'eau.

Discussion : une expérience « cruciale » ?

Le modèle corpusculaire est donc rejeté. Alors, une expérience « cruciale » ? Non. Mais ceci n'est généralement pas souligné à l'époque et l'expérience de Foucault confortera la suprématie du modèle ondulatoire « classique », classique c'est à dire « avec éther ». De fait, l'expérience de Foucault rejette, non pas *tout modèle corpusculaire*, mais seulement une *hypothèse très particulière* remontant à Descartes dont était affecté le modèle de l'époque : la conservation de la composante de vitesse parallèle au plan de séparation¹⁵. Descartes, par analogie avec la loi de la réflexion, se basait sur l'idée que « rien ne se passe dans cette direction ». En combinant cette hypothèse avec la loi de la

¹⁵ Pour Descartes, il ne s'agissait encore ni d'ondes ni de corpuscules au sens des siècles suivants, mais de la *propagation successive dans l'espace* d'une « tendance au mouvement » – une sorte de potentialité – obéissant néanmoins aux lois de la Mécanique.

réfraction, on obtient en effet, par un raisonnement élémentaire (théorème de Pythagore), la prédiction que la vitesse de la lumière doit être plus grande dans l'eau que dans l'air.

Une expérience est toujours liée au cadre scientifique, technologique, épistémologique voire philosophique de son époque, elle est élaborée pour répondre, dans ce cadre, à une question posée. Évitions donc l'adjectif « crucial ». Existe-t-il cependant quelque chose de « définitif » dans le résultat de Foucault ? Oui. Désormais, tout modèle, toute théorie devra incorporer le fait que la lumière ralentit en pénétrant dans les corps réfringents. Et, un demi-siècle plus tard, le photon, cet étrange enfant de Planck et Einstein, se conformera sagement au résultat de Foucault. Ainsi, une expérience réussie contraint les théories du futur. La science avance ainsi.

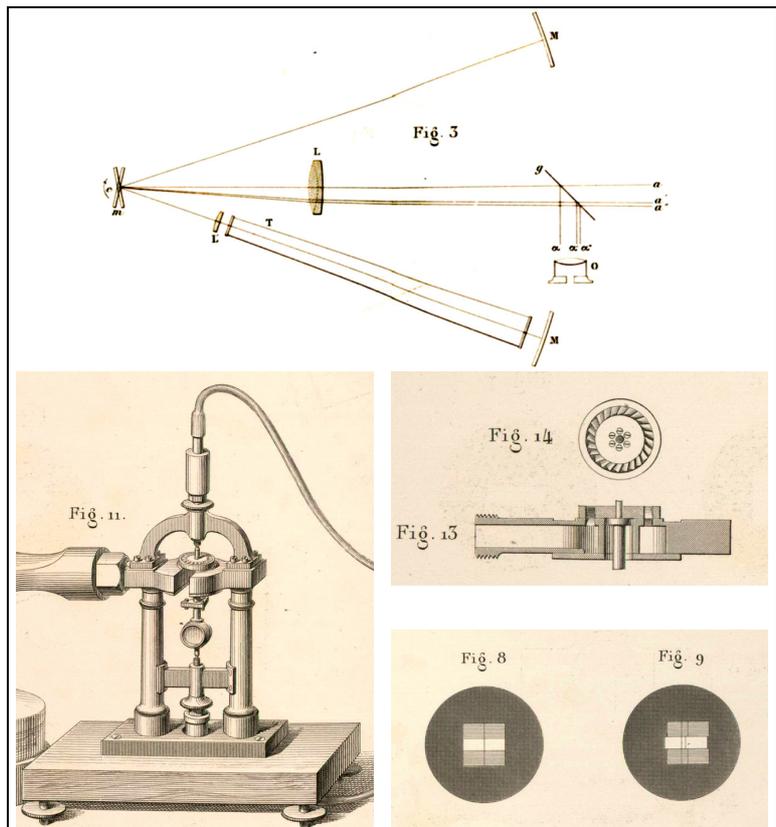


Fig.1. Extraits de la Planche 4 du Recueil des travaux scientifiques de Léon Foucault

Description de l'expérience de 1850

- 'Fig 3'. Schéma général. La lumière issue d'un héliostat vient de droite, traverse la lame semi-transparente g, tombe sur le miroir tournant m, est renvoyée successivement vers les deux miroirs fixes M-M. Pendant le temps d'un aller-retour mMm, le miroir m, en rotation à environ 400 Hz, a pivoté légèrement : le faisceau de retour final est renvoyé dans une direction légèrement différente de l'incidente. L'image finale, observée en a lorsque m est à l'arrêt, est déplacée en a' et a'' respectivement pour le faisceau ayant voyagé uniquement dans l'air et pour celui ayant traversé le tube d'eau T. Important : le miroir M est concave, son centre de courbure est au centre de m afin d'assurer un retour inverse selon le même chemin pendant toute la durée du balayage de M. Distance mM : 4 m. Longueur du tube T : 3 m.
- 'Fig. 11'. Le miroir tournant, son compensateur d'inertie (triangle sur l'axe) et sa turbine.
- 'Fig. 13-14'. Détail de la turbine, 24 pales et deux trous d'injection.
- 'Fig. 8-9'. Ce que voyait Foucault : les parties en grisé correspondent au faisceau ayant traversé le tube d'eau ; l'image est davantage déplacée.

Un outil pour la mesure des distances

Au milieu du siècle vont apparaître les premières mesures absolues sur Terre de la vitesse de la lumière dans l'air. Pourquoi un tel intérêt tout à coup ? Est-ce important ? La non-observation des parallaxes stellaires¹ a longtemps été un argument contre le mouvement orbital de la Terre. La première d'entre elles n'est mesurée par Bessel qu'en 1838, et sa valeur n'est que 0,31". La base utilisée est le grand axe de l'orbite terrestre, soit environ 300 millions de km, ou deux fois la distance Terre-Soleil (dite « unité astronomique, u.a. »). D'où l'importance d'une connaissance aussi précise que possible de cette distance.

Or, la mesure indépendante de la vitesse de la lumière sur Terre va permettre d'inverser les raisonnements utilisés par les astronomes pour déterminer la vitesse de la lumière.

Par exemple, le temps mis par la lumière pour traverser l'orbite de la Terre est connu à partir de l'observation des satellites de Jupiter ; en le combinant avec la vitesse de la lumière, on obtient le diamètre de cette orbite. De même, une mesure d'aberration stellaire « dans le ciel », combinée à la vitesse de la lumière, conduit aussi à ce diamètre. En effet, l'angle d'aberration est égal au rapport v/c de la vitesse orbitale de la Terre à la vitesse de la lumière et vaut – pour toutes les étoiles – environ 1/10000 radian ou 20 secondes d'arc. Une mesure indépendante de c conduit donc à la vitesse de la Terre sur son orbite, d'où l'on déduit la longueur et le diamètre de celle-ci. On pourra ainsi corroborer les distances dans le système solaire jusqu'ici déduites des seules parallaxes planétaires. Arago comprend cela : la vitesse de la lumière est sur le point d'entrer dans le domaine de la Métrologie.

La première détermination terrestre est effectuée en 1849 par Fizeau² grâce à un dispositif à roue dentée qui « hache » un faisceau lumineux envoyé en aller-retour de Suresnes à Montmartre (expérience déjà décrite dans les Cahiers Clairaut). Fizeau publie 315000 km/s, valeur sensiblement supérieure à celle des astronomes. Mais il ne s'agit pas encore d'une détermination définitive. Citons Arago rapportant cette expérience à l'Académie des sciences :

En répétant ces observations avec des appareils mécaniquement plus parfaits, on pourra un jour,

¹ Parallaxe stellaire : angle sous lequel le demi-grand axe de l'orbite terrestre est vu depuis une étoile. Se déduit de la différence des directions de visée de l'étoile depuis la Terre à six mois d'intervalle.

² Fizeau, H. (1849), *C.R. hebd. Acad. Sci.*, **29**, 90-94.

sans sortir de Paris et de sa banlieue, trouver cette parallaxe du Soleil³ qui, vers le milieu du siècle dernier, donna lieu à des voyages si longs, si lointains, si pénibles, et à tant de dépenses⁴.

Cependant, Fizeau, absorbé dans d'autres recherches (notamment l'entraînement de « l'éther » par les fluides en mouvement), ne perfectionnera pas son dispositif. Une douzaine d'années plus tard, Le Verrier, directeur de l'Observatoire, demande à Foucault d'adapter son expérience qualitative de 1850 à une mesure quantitative précise de la vitesse de la lumière. En effet, ses calculs d'interactions mutuelles des planètes, dans lesquels il est passé maître, lui font penser que les valeurs de la distance Terre-Soleil données par les astronomes, comme celle déduite de la mesure de Fizeau, sont surestimées de quelques pourcents. Foucault mène l'expérience à bien en 1862 et publie 298000 km/s⁵. La distance Terre-Soleil s'en trouve immédiatement réduite dans la même proportion.

Le Verrier est satisfait. De ce jour, la vitesse de la lumière, devient, en puissance, l'outil idéal pour la mesure des distances. Cerise sur le gâteau : contrairement aux parallaxes planétaires, cette nouvelle méthode est indépendante de la « figure » et des dimensions de la Terre : voilà un gigantesque saut virtuel dans l'espace.

D'une expérience qualitative à un outil métrologique

Comment Foucault a-t-il transformé une expérience qualitative en une expérience précise de Métrologie ? Il lui faut *pousser à leurs limites les technologies disponibles*. Cela va lui imposer des modifications importantes, sans toutefois remettre en cause le principe de l'expérience et le matériel de base. Pressé par le temps (Le Verrier !), Foucault n'envisage pas la construction d'un nouveau miroir tournant mais va réutiliser celui de 1850 – avec d'importantes améliorations – et de même avec le miroir fixe. Quelles contraintes s'imposent donc à lui ? Des contraintes *optiques*, des contraintes *mécaniques* et des contraintes d'ordre *chronométrique*.

³ Parallaxe du Soleil : angle sous lequel le rayon équatorial de la Terre est vu depuis le centre du Soleil. Cela équivaut à connaître sa distance.

⁴ Arago fait ici allusion aux lointaines et coûteuses expéditions montées pour observer les passages de Vénus devant le Soleil en 1761 et 1769, afin d'affiner la connaissance de la distance Terre-Soleil selon une variante de la méthode des parallaxes planétaires.

⁵ Foucault, L. (1862) *C.R. hebd. Acad. Sci.*, **55**, a) 501-503 et b) 792-796.

Des contraintes optiques

L'augmentation de la précision requiert une augmentation importante de la distance entre miroirs ; celle-ci est portée à 20 mètres, au lieu de 4 m en 1850. D'où des contraintes optiques : d'une part, éviter la divergence du faisceau (on n'a pas de laser !) ; d'autre part, sachant que le faisceau de retour est intermittent, si l'on veut conserver la même intensité lumineuse moyenne en retour, il faut que le miroir fixe éloigné soit vu, depuis le miroir tournant, sous le même angle qu'en 1850. Afin de n'avoir pas à réaliser un miroir fixe plus grand, Foucault avait envisagé, dès 1850, de « transporter l'image » par un système optique afocal similaire à celui qui sera utilisé ultérieurement dans les périscopes (Foucault, 1854) : le faisceau tombe alors sur le miroir final *exactement comme s'il venait d'un miroir tournant placé à 4 mètres*. En 1862, il ajoute un important perfectionnement : ce qu'on réaliserait avec des lentilles intermédiaires, on peut tout aussi bien le faire avec des miroirs concaves de même focale disposés en zigzag, il n'y a alors plus de pertes par absorption. La solution est géniale, mais demande des réglages extrêmement minutieux. Telle est donc la vraie raison du « repliement du faisceau en zigzag », il ne s'agissait pas de gagner de la place !

Des contraintes mécaniques

Les problèmes mécaniques vont conduire à plusieurs adaptations et améliorations décisives. La turbine de 1850 et son entraînement à la vapeur d'eau sous une demi atmosphère (soit 5 m à la colonne d'eau) ne sont absolument pas optimaux : à l'époque, il avait fallu aller vite (concurrence de Fizeau), on attendait une réponse par oui ou par non, la précision n'était pas requise (Foucault, 1854, p. 157). Il en va tout autrement en 1862. Foucault doit impérativement obtenir un fonctionnement absolument régulier et sans vibrations de la turbine, ce qui n'était pas le cas en 1850 avec notamment des problèmes de condensation de vapeur d'eau. Il va donc, avec Froment, réviser entièrement la conception de la turbine et de son système d'alimentation dans lequel la vapeur d'eau va être remplacée par de l'air sous basse pression.

– *le dessin de la turbine* : en 1850, la turbine possède 24 aubes droites et deux trous d'injection (figure 1). La nouvelle turbine de 1862, toujours construite par Froment, a 16 aubes (figure 2) mais cette fois 16 trous d'injection : l'efficacité s'en trouve multipliée par 8 par cette seule raison.

Ce n'est pas tout : Foucault va mettre à profit les progrès récents en *Mathématiques appliquées* qui avaient permis de déterminer la forme idéale des

aubes de turbine. Il fait appel à l'académicien L.-D. Girard (1815-1871), qui décrit le fameux tracé des aubes courbes « à veine d'eau moulée » qui connaîtra un développement considérable en matière de turbines à eau, à gaz ou à air. Il gagnera encore un facteur 2 du fait qu'il utilise de l'air à 290 K au lieu de vapeur d'eau à 373 K (rapport des densités des deux fluides, compte tenu des températures d'utilisation).



Fig.2. Miroir tournant de l'expérience de 1862 (Observatoire de Paris). On notera les 16 pales de la turbine redessinée, ainsi que le cylindre d'aluminium entourant les trois vis d'ajustage du compensateur d'inertie visibles sur le modèle de 1850 (fig. 1). Le miroir a perdu son argenture.

– *le cylindre d'aluminium* : Foucault profite de la nouvelle préparation de l'aluminium mise au point entre 1854 et 1859 par son ami, le chimiste Henri Sainte-Claire Deville. Un tambour cylindrique en aluminium entoure maintenant le compensateur d'inertie triangulaire, évitant des turbulences lors de la rotation à vitesse élevée (figure 2) ;

– *la soufflerie de Cavaillé-Coll* : Foucault souhaite donc alimenter sa turbine avec de l'air et grâce aux progrès sur la turbine, une faible pression lui suffit. L'avantage est évident : moins de puissance, moins de « vent », moins de risques de vibrations, contrôle du flux plus aisé. Pour l'alimentation, il a une idée révolutionnaire : il s'adresse à son voisin et ami, le célèbre facteur d'orgue Aristide Cavaillé-Coll. Car qui, mieux qu'un facteur d'orgue, est capable de produire « un vent stable, ni trop fort ni trop faible, et ce, le plus simplement et le plus longtemps possible » ?

Cavaillé-Coll construit la soufflerie sur le principe des *mannequins*, petits orgues d'atelier à deux ou trois rangs, utilisés pour harmoniser les tuyaux

d'orgue. Elle est complétée par un double régulateur à « poids-curseur » spécialement conçu permettant d'obtenir une pression constante et finement ajustable (figure 3).

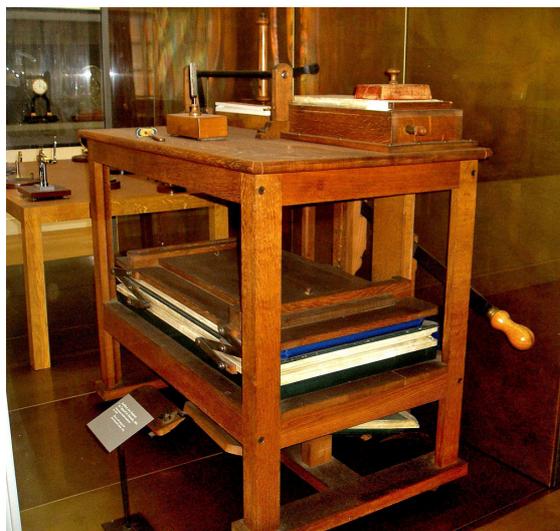


Fig.3. La soufflerie de Cavallé-Coll (Musée des Arts et Métiers, Paris). Le soufflet, en cuir clair, est ici dégonflé. Le régulateur « à poids curseur » est sur le dessus. Les pédales situées à la base servent au gonflage.

Finalement, il suffira d'une pression de 30 cm d'eau – soit plus de seize fois inférieure à celle de 1850 – pour entraîner la turbine à la même vitesse et avec une régularité considérablement améliorée⁶.

Des contraintes chronométriques

Contrairement à l'expérience de 1850, le résultat dépend ici directement de la connaissance *précise* de la vitesse de rotation du miroir. À cet effet, Foucault invente un système stroboscopique qu'il baptise « rouage chronométrique » : il va hacher le faisceau de retour, avant son entrée dans le dispositif d'observation, à l'aide d'une roue dentée portant 400 dents sur sa périphérie entraînée à exactement un tour par seconde. Le faisceau de retour est intermittent, à la fréquence même du miroir tournant. En ajustant le flux d'air de manière que les dents paraissent fixes dans le microscope, il est certain que son miroir tourne exactement à 400 tours/s. C'est Froment, mécanicien hors pair, qui construit l'horloge, une merveille de précision (figure 4). Citons Foucault : « il m'arrive de lancer le miroir à 400 tours/s et de voir les deux appareils marcher d'accord à 1/10 000 près pendant des minutes entières » (Foucault, 1862b).

⁶ Cependant, Foucault parle de la « soufflerie à haute pression de M. Cavallé-Coll ». En fait, 30 cm de hauteur d'eau représente deux à trois fois les pressions usuelles dans les soufflets d'orgue. D'où le terme.



Fig.4. L'horloge de Froment et le « rouage chronométrique ». L'horloge (Observatoire de Paris) entraîne à raison d'un tour par seconde la roue finement dentée (400 dents) visible au centre, en avant de l'horloge. Les dents hachent le faisceau de retour, venant de droite et réfléchi par la lame semi-transparente, avant son entrée dans le microscope d'observation dont on aperçoit la partie avant à gauche.

Conclusion

Après Foucault, la vitesse de la lumière n'est pas encore la constante fondamentale que nous connaissons, « indépendante de tout », du mouvement de la source comme de celui de l'observateur. Cependant les premiers indices troublants de cette indépendance remontent au XVIII^e siècle avec l'observation des premières étoiles doubles. Et aux expériences d'Arago et Fresnel au début du XIX^e. Le siècle vivra avec ce problème latent. On connaît la suite : cette indépendance, replacée dans le cadre d'une théorie générale – la Relativité d'Einstein – rend aujourd'hui cet outil d'autant plus précieux pour la mesure des distances.

Les deux expériences de Foucault, 1850 et 1862, avec le même principe de base, en partie le même matériel et donc le même expérimentateur, sont emblématiques des deux grandes catégories d'expériences scientifiques. D'une part, des expériences à finalité épistémologique : établir, illustrer une loi ou un modèle, réfuter ou valider des théories. D'autre part, des expériences précises de Métrologie: dans ce dernier cas, personne ne connaît à l'avance le « vrai » résultat. Et c'est très différent. Léon Foucault, lui, s'est illustré dans les deux domaines.

Pour en savoir plus

William Tobin, (2002) *Léon Foucault*, Les Ulis, EDP-Sciences.
Les magiciens de la lumière, un film du SCAVO, Université Paris-Sud, Faculté d'Orsay. Contact : <christine.azemar@u-psud.fr>
 Pierre LAUGINIE, Groupe d'Histoire et de Diffusion des sciences d'Orsay (GHDSO), Université Paris-Sud, 91405 Orsay cedex.