

Analyse personnelle MADELHIS UE 903, EC 2*

Léo Vacher

2022

Dans ce court essai, nous proposons de replacer dans son contexte historique et scientifique la lettre du 15 Mai 1894 de A.A. Michelson à J.R. Benoît issue du corpus d'échanges [1] ayant déjà précédemment fait l'objet d'une transcription. Nous verrons comment celle-ci s'inscrit en continuité avec les lettres du corpus de 1892 à 1894 dans le cadre de la publication par Michelson du mémoire sur la *détermination expérimentale de la valeur du mètre en longueurs d'ondes lumineuses* (Michelson, 1894, [2]). Nous commencerons par présenter la carrière et la vie de Michelson, jusqu'au début des années 1890. Nous détaillerons ensuite ses travaux sur l'établissement d'un étalon de longueur de 1887 à 1892 et les différents acteurs impliqués. Nous serons alors armés pour conclure sur la place et le contenu des échanges entre Michelson et Benoît de 1892 à la lettre du 15 Mai 1894. Un grand nombre d'anecdotes sur la vie personnelles de Michelson sont extraites de (Livingston, 1979, [3]), qui a fortement appuyé cette analyse.

Albert Abraham Michelson est née de parents juifs en 1852 à Strelno en Pologne, anciennement inclus dans le royaume de Prusse (James, 2009, [4]). Il part avec ses parents à l'âge de 2 ans vivre à Murphys en Californie puis fait son Lycée à San Francisco. Sa famille s'installe ensuite à Virginia City dans le Nevada en 1869. La même année, il rejoint la US Naval Academy. Malgré sa seconde position au concours d'entrée, une place lui est offerte par le Président Ulysses S. Grant (Haïdar, 2014, [5]).

Il épouse en 1877 Margaret Hemingway, fille d'un commerçant New-Yorkais, avec qui il aura trois enfants, deux fils et une fille nés respectivement en 1878, 1879 et 1881.

Alors officier de la U.S. Navy à Annapolis en 1877, il lui est demandé de préparer un cours sur la méthode utilisée par Jean Bernard Léon Foucault [1819-1868] en 1862 pour déterminer la vitesse de la lumière à l'aide d'un miroir tournant (Foucault, 1862, [6]). La conclusion que la lumière se déplace à une vitesse finie et l'estimation de celle ci avaient déjà pu être effectués par Ole Rømer [1644-1710] dès 1676, à partir d'observations des satellites de Jupiter, mais jusqu'alors seul trois physiciens français : Hippolyte Fizeau [1819-1896] , Alfred Cornu [1841-1902] et enfin Foucault, s'étaient risqués à la délicate mesure en laboratoire (Raynaud, 2013, [7]). Alors qu'il passe en revue les démonstrations de Foucault, Michelson remarque que "a modification suggested itself" (Michelson, 1879, [8]), l'amenant à raffiner le précédent dispositif et à réaliser en 1879 la mesure la plus précise de la vitesse de la lumière, améliorant d'un facteur deux cent les résultats de Foucault.

En ce temps, la lumière est comprise comme un phénomène ondulatoire, interprétation solidement appuyée par l'expérience de Thomas Young [1773-1829] en 1801 : Un faisceau de lumière scindé en deux par diffraction dans deux fentes produit un schéma d'interférence lorsqu'un écran est placé en aval (Buchwald & Fox, 2013, [9]). Les interférences étant propres aux ondes, seul un phénomène ondulatoire peut expliquer une telle observation. En 1864 James Clerk Maxwell [1831-1879] théorise la nature de ces ondes en unifiant optique, électricité et magnétisme. La lumière est alors comprise comme une perturbation périodique des champs de forces électriques et magnétiques se propageant de proche en proche. Une onde devant être comprise comme étant un déplacement d'énergie sans déplacement de matière. Comme le son se déplace dans l'air ou les vagues à la surface de l'eau, il est naturellement supposé que les ondes électromagnétiques se propagent dans un milieu, appelé éther.

*Nombre de mots hors bibliographie et notes de bas de page : 3577. Pour toute requête, contacter vacher.leo.etu@gmail.com

Michelson apportera ses contributions majeures à la physique en exploitant les propriétés ondulatoires de la lumière à travers l'interférométrie. Celle-ci consiste à étudier les interférences entre deux faisceaux lumineux aux parcours différents. Il est alors possible d'effectuer des mesures très précises de distances ou de vitesse en comparant le trajet des deux faisceaux.

Dès la fin des années 1870, Michelson, alors sous la supervision de l'astronome Simon Newcomb [1835-1909] à Washington, imagine un interféromètre permettant de mettre en évidence le mouvement de la Terre dans l'éther. Il s'agira de mesurer le changement de vitesse de la lumière lors de sa course autour du Soleil en mesurant par interférométrie la différence de parcours entre deux rayons perpendiculaires à six mois d'intervalle.

Seul puis aux côtés de E.W. Morley [1838-1923] à la Case School of Engineering de Cleveland, qu'il rejoint en 1883, il réalise de 1881 à 1887 ce qui sera son expérience la plus célèbre (Michelson & Morley, 1887, [10]). Deux tentatives sont effectuées, avec une précision grandissante, et échouent à mesurer une variation de la vitesse de la lumière. La Terre se déplaçant à environ 30 km/s autour du Soleil et ainsi par rapport à l'éther, une détection est attendue surpassant de 40 fois celle effectivement observée (Shankland, 1964, [11]). Le résultat, grandement attendu par la communauté scientifique, provoque un profond étonnement. De nombreuses explications sont alors proposés : impact de l'ellipticité de la Terre, entraînement de l'éther par l'atmosphère ... Michelson penchera d'ailleurs en faveur de cette dernière interprétation en un premier temps. En 1895, le physicien néerlandais Hendrik Lorentz [1853,1928] proposera une transformation permettant de passer d'un référentiel immobile par rapport à l'éther à un second en mouvement rectiligne uniforme, préservant les équations de Maxwell et rendant ainsi invariante la vitesse de la lumière (Lorentz, 1895, [12]). Une telle transformation nécessite l'introduction d'une variable appelée *temps local* auquel Lorentz ne donne pas d'interprétation claire et introduit une contraction des objets dans le sens de leur mouvement par rapport à l'éther. Cette transformation et ses propriétés sont ensuite formalisées et développées mathématiquement par Poincaré [13]. Ultimement, les transformations de Lorentz seront enfin reprises par Einstein en 1905 (Einstein, 1905, [14]). Il arrivera à la conclusion que les deux observateurs de Lorentz sont parfaitement symétriques en ce qu'aucun n'est absolument immobile ou en mouvement. Le temps local est interprété comme un temps physique mesuré, différent selon les observateurs. Les notions d'éther et de référentiel privilégié se voient abandonnées au profit d'un espace et d'un temps relatif. L'interprétation Einsteinienne du principe de relativité, fait encore majoritairement consensus aujourd'hui (Samueli, 2011, [15]). En cela, la non-détection de Michelson et Morley entraînera malgré eux, un des plus grands bouleversements conceptuels de la physique moderne.

De plus, Michelson utilisera l'interférométrie pour effectuer des mesures de haute résolution en astronomie à partir de 1890, notamment en cherchant à mesurer le diamètre des satellites de Jupiter (Michelson, 1890 & 1891, [16] [17])¹. Bien plus tard, en 1921, avec l'astronome Francis G. Pease [1881-1938], il utilisera l'interférométrie pour réaliser la première mesure du diamètre apparent d'une étoile extra-solaire avec la supergéante rouge Bételgeuse (Michelson & Pease, 1921, [19]).

Non seulement Michelson a ainsi révolutionné l'interférométrie sur le plan technique, mais il fait preuve d'une maîtrise unique de cet instrument qu'il utilise avec une obsession de précision. Comme l'exprimerons, non sans humour, ses collaborateurs : "a Michelson interferometer (is) a marvelous instrument, when operated by a Michelson" (p.109, (Livingston, 1979, [3])).

Au début des années 1890, après une décennie d'expériences révolutionnaires, la réputation de Michelson ne fait que prendre de l'ampleur. Il gagne notamment le Rumford Prize en 1888 pour ses travaux sur l'éther. Son expertise de l'optique est reconnue, motivée depuis toujours par une fascination pour les phénomènes lumineux, dont il qualifiera lui-même l'étude de "so much fun" (p.11 (Livingston, 1979, [3])).

Cependant, cette période est loin de lui être favorable sur le plan personnel: Michelson est grandement affecté par le non-résultat de sa mesure du déplacement dans l'éther qu'il considère comme un échec personnel. Il est de plus frustré par ses interactions avec les physiciens

¹Michelson invente pour ainsi dire l'interférométrie astronomique, promise à un grand futur. C'est notamment sur un principe similaire qu'on a détecté les ondes gravitationnelles par LIGO-VIRGO en 2017.[18].

théoriciens comme Lorentz ou Oliver Lodge [1851-1940], qui semblent tirer des conclusions et des justifications incompréhensibles et presque grotesques de son résultat. Les relations qu'il entretient avec sa femme Margaret se sont progressivement dégradées et ils sont désormais en termes froids et distants bien que polis. Il s'éloignera également de ses enfants. Sa fille Elsa déclarera ainsi avoir des difficultés à se rapprocher de son père: " To us he seemed like a very important guess in the House" (Lettre de Elsa p.106 (Livingston, 1979, [3])). Les enfants resteront par ailleurs toujours très proche de leur mère. En 1885, obsédé par son travail, il mange et dort très peu, le conduisant à un point de rupture nerveuse où il sombre dans le stress et la dépression. Il devient anormalement agressif envers ses collègues et sa famille. Sur avis d'un médecin, il est ainsi forcé d'arrêter ses recherches pendant quelques mois. En 1886, un feu se déclenche à la Case School, détruisant une grande partie du matériel de Michelson. En 1887, un vol a lieu sur sa propriété. La même année, sa femme de ménage Ruth et une amie à elle font pression sur Michelson en faisant du chantage. Il refuse de céder, conduisant les deux femmes à mettre leurs menaces à exécution en allant l'accuser auprès des forces de l'ordre. Michelson sera alors arrêté pour tentative de séduction et coups et blessures (p.96, (Livingston, 1979, [3])). Cependant, l'affaire sera vite dissipée et n'aura pas de suite. Durant cette période difficile, Morley se montrera d'un très grand soutien sur tous les plans. Il finira la mesure entreprise par Michelson sur l'éther quand son état de santé sera trop inquiétant, le soutiendra face aux accusations et lui donnera accès à son laboratoire pour continuer ses expériences après l'incendie.

Suite à cette série d'évènements éprouvants, Michelson quitte Morley et la Case School en 1889 pour la Clark University, et s'installe avec sa famille à Worcester dans le Massachusetts où il emporte son matériel. Les mésaventures continueront là-bas, dans une moindre proportion : il lui est difficile d'obtenir le matériel qu'il demande et les tensions grandissent entre les scientifiques et les gérants de l'université. Des pour parler avec le président de l'université, le psychologue G. Stanley Hall [1844-1924] sont mis en place (Pruette, 1926, [20]) mais rien ne semble changer. L'université voit le départ progressif de nombreux de ses scientifiques, dont Michelson comme nous le verrons.

C'est à travers ces nombreux bouleversements que Michelson commence à travailler activement sur la recherche d'un étalon de longueur universel à partir des propriétés de la lumière.

Une telle recherche fait partie des priorités scientifiques du XIX^e siècle. À la suite de la révolution française, les sciences modernes sont en pleine transformations et recherchent l'unification et l'uniformisation. Pour permettre aux scientifiques de différents pays de comparer leurs résultats il devient en effet absolument nécessaire d'établir des unités précises sur lesquelles s'accorder. Cette volonté de réformes est grandement entreprise par les scientifiques Français.

Dès 1791, l'académie royale des sciences suggère l'utilisation du mètre comme unité de longueur universelle et en 1840, une loi passe interdisant l'utilisation d'unités hors de celles du système métrique [21], [22]. Lors de l'exposition universelle de 1867 à Paris, le mètre est définitivement choisi comme unité universelle de longueur et le bureau international des poids et mesures (BIPM) est créé pour assurer la mise en place de l'uniformisation des systèmes d'unités [23]. Le mètre est défini comme un dixième de million d'un quart de méridien terrestre. Cette définition est très peu fiable en raison des irrégularités de la Terre et de ses changements de forme au fil des mouvements tectoniques. On construit alors des prototypes de mètre identiques, formés d'une barre en platine iridium et palladium de section cruciforme. Elles sont distribuées à chaque nation membre du BIPM et régulièrement comparées à un étalon resté à Paris. Définir le mètre ainsi reste problématique, car l'étalon physique est très sensible aux variations de température ou de pression et peut se détériorer ou être détruit lors d'un accident. On recherche alors activement une définition universelle, absolue, précise et stable de l'unité de longueur. Pour cela, il devient indispensable de chercher une définition indépendante d'un objet matériel.

Dès 1887 à la Case School, Michelson cherche une ligne d'émission dans les spectres des gaz incandescents qui soit stable et bien résolue. Avec l'aide de Morley, il s'intéresse à l'émission de nombreux éléments et mesurent jusqu'à une centaine de lignes. Ils font également concevoir un

interféromètre appelé le "comparer" dans l'optique de pouvoir mesurer le mètre étalon en terme de longueur d'ondes de l'émission choisie. Leur intérêt se porte fortement sur le Sodium qui présente un doublet de lignes orangées particulièrement stables. En 1897, ils publient une note discutant la possibilité d'utiliser le doublet de cet élément pour établir un étalon fondamentale de longueur (Michelson & Morley, 1887, [24]).

L'astronome Benjamin Gould [1824-1896], membre américain du BIPM lit l'article et le présente au Bureau. Le directeur du bureau, J.R. Benoît [1844-1922] entre en contact avec Michelson et Morley, les incitant à continuer leurs recherches [25].

En 1888, Michelson assiste à une réunion de l'American association for the advancement of science où il insiste sur le rôle qu'aura à jouer l'interférométrie pour les mesures de haute précision mais ne mentionne pas l'expérience de l'éther, qu'il considère peut être encore comme un échec. (Michelson, 1888, [26])

Dans un second papier, Michelson montre plus tard que les lignes spectrales du Cadmium fournissent un meilleur candidat que celles du Sodium pour établir un étalon de longueur (Michelson & Morley, 1889, [27]). Alors à la Clark University, Michelson décidera de continuer ce travail seul, en congédiant froidement Morley du projet. Blessé par cette décision, Morley ne fera pas état de cette décision et Michelson restera malgré tout en étroit contact avec celui qui fut son mentor, soutien et ami pendant plus d'une décennie [28].

En 1891, Gould soumet une demande au BIPM (p. 107-109, [29]) dans laquelle il souhaite inviter Michelson à Breteuil et l'indemniser pour réaliser une mesure du mètre étalon en terme de longueur d'onde lumineuse, rappelant qu'une telle mesure fait partie des priorités du Bureau. La demande est acceptée à l'unanimité par le Bureau et Gould contact Stanley Hall en 1892 requêtant la venue de Michelson à Sèvres, en France, pour réaliser la mesure tant attendue et ce pour une durée de six mois [30]. Michelson et son assistant Frank L. O. Wadsworth partent alors pour la France où ils doivent retrouver le directeur du bureau, J.-R. Benoît. Il emporte avec lui le comparer et saisit cette opportunité de s'éloigner de la Clark University qu'il quitte brutalement, décrit par un collègue comme "Mad as a hornet" (p.120 ,Livingston, 1979, [3]).

C'est ici que commence l'échange épistolaire entre les deux protagonistes. Dans la première lettre du 24 Février 1892 [1], Michelson s'introduit à J.R. Benoît et envoie une liste de préparatifs à effectuer pour la chambre dans laquelle aura lieu l'expérience. La seconde lettre du 25 Avril 1892 [1] doit précéder l'arrivée de Michelson au Havre, où il blague qu'il sera facilement reconnaissable à la difficulté qu'il aura à expliquer la présence de son interféromètre aux douaniers. Cependant, on apprend dans la lettre du 3 Mai qu'il doit reporter son départ. Ces deux lettres sont suivies de réponses de Benoît le 14 Avril puis le 20 Mai où il le tient au courant de l'avancée des préparatifs et déclare être impatient et honoré de le recevoir. Comme détaillé dans la lettre du 30 Juin, Michelson et sa famille partent enfin à bord du paquebot *Bourgoyne* pour Le Havre, le 9 Juillet 1892. Sa famille s'installe à Paris et il commencera alors à travailler à Sèvres, dans la pièce préparée par Benoît, aux cotés de ce dernier et avec l'aide de ses deux adjoints Pierre Chappuis [1855-1916] et Charles Edouard Guillaume [1861-1938].

A son arrivée, Michelson découvre que le comparer a été grandement endommagé par le voyage. Michelson et Wadsworth passeront six semaines à le reconstruire patiemment. Profitant de ce temps pour perfectionner la théorie de l'expérience, Michelson dessine et peint lors de longues promenades le long de la Seine. Le physicien a en effet depuis toujours un goût prononcé pour les arts tels que la peinture et la musique. Il décidera plus tard de prolonger son séjour en France, l'expérience demandant plus de temps prévu. On imagine donc que ce voyage a Paris représente pour lui une bouffée d'air frais et un échappatoire à la Clark University où il n'a pas le coeur de retourner, la situation y étant encore tendue. Le caractère agréable de ce séjour est certainement renforcé par les bonnes relations qu'il entretient avec les physiciens français. Benoît déclarera: "Je ne saurais laisser échapper cette occasion de dire combien moi-même, et nos Adjoints, MM. Chappuis et Guillaume, [...] avons été charmés de cette longue collaboration avec l'aimable autant qu'éminent professeur américain; et de remercier notre Collègue M. Gould, dont l'initiative a fait naître les circonstances qui nous ont ménagé avec lui des relations intimes et cordiales [...] nous conserverons le meilleur souvenir des jours

qu'il a passés au milieu de nous" (p.100, [31]).

Une fois le comparer reconstruit, les mesures commencent. Au cours de l'année 1893, elles se font de plus en plus précises. Durant cette période, Benoît tombera brusquement malade, atteint d'une violente pleuro-pneumonie, le forçant à interrompre son travail pour trois mois (p.46, [31]). Avant et après cet incident, il apportera une contribution majeure durant tout le déroulement de l'expérience, qu'il répétera lui même indépendamment de nombreuses fois puis raffinera. Il poursuivra ensuite les expériences sur la recherche d'un étalon de longueur en ondes lumineuses bien après le départ de Michelson (Gardner, 1955, [32]), (p.6-8 et p.55-56, [31]).

Arrivés au résultat final, les physiciens pourront conclure que "le Mètre contient 1553163,6 longueurs d'onde de la raie rouge du cadmium, [...] à un peu moins de 1 micron près" (p.6, [31]).

Après son voyage en France, Michelson ne revient pas à Clark et rejoint directement la toute jeune University of Chicago, où il est convié et nommé Professeur et Chef du Département de physique. La ville de Chicago est alors en pleine transformation. Elle devient un pôle commercial de première importance, des gigantesques grattes ciels sont construits et la ville jouit de la culture riche de nombreux immigrants venant des quatre coins du monde. En parallèle, le crime et les cartels prennent de plus en plus d'ampleur.

Michelson lit le discours le jour de l'inauguration du laboratoire de physique Ryerson le 2 juillet 1894 "The evolution and Influence of Experimental Physics" glorifiant la récente explosion de la physique expérimentale. Le XIX^e siècle a en effet été témoin d'un bouleversement de la physique au niveau de ses méthodes et elle entraîne avec elle la révolution industrielle. Sa démarche laisse une place de plus en plus grande à l'expérimentation et à la technique, voyant la naissance de l'ingénierie et de la physique appliquée (Sweetnam, 1996, [33]) .

L'échange de lettres reprend le 3 janvier 1894 concernant la rédaction du mémoire rendant compte de l'expérience ayant eu lieu à Paris. Benoît est responsable de la traduction en français du manuscrit que lui a laissé Michelson et de la réalisation des planches et figures associées (Michelson, 1894, [2]), (p.99, [31]). Dans sa lettre, Michelson fait part de son impatience concernant l'avancée du travail, dont il n'a pas reçu de nouvelles depuis la fin de l'expérience. Il suggère alors de procéder lui-même à la publication. Benoît répondra dans une lettre datée du 16 janvier où il fera part des difficultés qu'il a dû affronter pour faire publier le mémoire. Chappuis est tombé malade et Guillaume a dû s'absenter pour effectuer son service militaire, laissant Benoît seul face à un service très chargé. Il est de plus, affecté par le récent décès de son père. Sur le plan matériel, les imprimeurs ont pris un retard contre lequel il est impuissant. Guillaume enverra par la suite la seconde impression du mémoire à Michelson.

Le physicien américain est très agréablement surpris par le résultat et le travail gigantesque fourni par Benoît au niveau des démonstrations et des figures. Il fait part de son enthousiasme dans une lettre du 16 avril et propose quelques corrections. Les deux physiciens se mettent ainsi d'accord sur la troisième et finale impression du mémoire. Dans une lettre du 2 mai, Benoît interroge Michelson sur la procédure à suivre concernant les diverses copies du mémoire et le matériel resté à Paris. La réponse se fait alors dans la lettre qui a été transcrite et que nous cherchions à remettre dans son contexte. Après une réponse technique et détaillée concernant la procédure à suivre concernant les copies du mémoire, les micromètres, les plaques et les thermomètres, on notera qu'il y fait également part de l'impossibilité de retourner à Paris au cours de l'année, ville pour laquelle il éprouve certainement une certaine nostalgie.

Après publication, le travail des deux hommes est indéniablement reçu comme un succès. On lira dans les procès verbaux des séances de 1894 : "[La Commission] est unanime à reconnaître la grande importance de ce beau travail, exécuté sous les auspices du Comité international des Poids et Mesures, et qui aura des conséquences précieuses pour plusieurs domaines scientifiques" (p.137 [31]) ou encore "La Commission a la conviction que tout métrologiste appréciera, comme elle, l'importance de ce progrès réalisé par l'emploi de la méthode de M. Michelson" (ibid).

Cependant, il faudra attendre 1960 pour que le BIPM abroge l'ancienne définition du mètre à partir de l'étalon physique. Il sera alors défini sur des principes comparables à ceux utilisés

par Michelson, à partir de la longueur d'onde du Krypton 86 [34]. En 1983, cette définition sera à nouveau remplacée pour une définition à partir de la vitesse de la lumière, encore en usage aujourd'hui [35].

References

- [1] *Corpus de lettres envoyés et reçues par A.A. Michelson de 1892 à 1920 (fourni dans le cadre de l'UE).*
- [2] A. Michelson, "Détermination expérimentale de la valeur du mètre en longueurs d'ondes lumineuses, traduction J.R. Benoît," 1894. [Online]. Available: <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k9693613c.texteImage>.
- [3] D. M. Livingston, *The master of light : a biography of Albert A. Michelson*. University of Chicago Press, 1979.
- [4] I. James, *Driven to Innovate: A Century of Jewish Mathematicians and Physicists*. Peter Lang Ltd, 2009.
- [5] R. Haïdar, *Sous la lumière, les hommes*. EDP Sciences, 2014.
- [6] J. B. L. Foucault, *Comptes rendus, vol. LV*. 1862, p.501-503 et 792-796.
- [7] D. Raynaud, *Les déterminations de la vitesse de la lumière (1676-1983). Étude de sociologie internaliste des sciences*. L'Année sociologique, 2013/2 (Vol. 63), 2013, pp. 359-398.
- [8] A. Michelson, "Experimental determination of the velocity of light," *Proceedings of the American Association for Advancement of Science, vol. XXVIII*, vol. 1, p. 124, Jan. 1879.
- [9] J. Z. Buchwald and R. Fox, "Optics in the Nineteenth Century" in *The Oxford Handbook of the History of Physics*. OUP Oxford, 2013.
- [10] A. A. Michelson and E. W. Morley, "On the relative motion of the earth and the luminiferous ether," *American Journal of Science*, vol. s3-34, no. 203, pp. 333-345, 1887, ISSN: 0002-9599. DOI: 10.2475/ajs.s3-34.203.333. eprint: <https://www.ajsonline.org/content/s3-34/203/333.full.pdf>. [Online]. Available: <https://www.ajsonline.org/content/s3-34/203/333>.
- [11] R. S. Shankland, "Michelson-morley experiment," *American Journal of Physics*, 1964. DOI: 10.1119/1.1970063.
- [12] H. A. Lorentz, *Versuch einer Theorie der electrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern*. Leiden: E. J. Brill, 1895, pp. 37-127.
- [13] M. Paty, "Poincaré et le principe de relativité.," in *Congrès International Henri Poincaré*, Greffe, J.-L. Heinzmann, G. et Lorentz, and Kuno, Eds., en gras dans le texte : modifications, 2004., Nancy, France: Akademie Verlag, Berlin/Albert Blanchard, Paris, May 1994, p. 101-143. [Online]. Available: <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00182765>.
- [14] A. Einstein, "On the electrodynamics of moving bodies," *Annalen Phys.*, vol. 17, pp. 891-921, 1905. DOI: 10.1002/andp.200590006.
- [15] J.-J. Samuëli, *L'éther des physiciens existe-t-il ?* Ellipses, 2011.
- [16] A. A. Michelson, "I. on the application of interference methods to astronomical measurements," *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, vol. 30, no. 182, pp. 1-21, 1890. DOI: 10.1080/14786449008619983. eprint: <https://doi.org/10.1080/14786449008619983>. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/14786449008619983>.
- [17] A. A. Michelson, "Measurement of Jupiter's Satellites by Interference," vol. 3, no. 17, pp. 274-278, Sep. 1891. DOI: 10.1086/120327.

- [18] LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration, “Observation of gravitational waves from a binary black hole merger,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 116, p. 061102, 6 Feb. 2016. DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.061102. [Online]. Available: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.116.061102>.
- [19] A. A. Michelson and F. G. Pease, “Measurement of the Diameter of α Orionis with the Interferometer.,” *astrophysical Journal*, vol. 53, pp. 249–259, May 1921. DOI: 10.1086/142603.
- [20] L. Pruette, *G. Stanley Hall: A Biography of a Mind*. D. Appleton, 1926.
- [21] G. Charles-Édouard, *La création du Bureau international des poids et mesures et son œuvre : ouvrage publié à l’occasion du cinquantième de sa fondation*. Paris: Gauthier-Villars et Cie, éditeurs Libraires du Bureau des longitudes, 1927.
- [22] *Comptes rendus des séances de la première conférence générale des poids et mesures*, 1889. [Online]. Available: <https://www.bipm.org/documents/20126/33145764/CGPM1.pdf/ab69792a-2e5e-2040-14d0-11464bc9414c>.
- [23] *Site officiel du bureau international des poids et mesures*. [Online]. Available: bipm.org.
- [24] A. A. Michelson and E. W. Morley, “On a method of making the wavelength of sodium light the actual and practical standard of length,” *American Journal of Science*, vol. s3-34, pp. 427–430, 1887.
- [25] *Benoît , Jean-René [Justin-Mirande René] (1844-1922)”, Les procès-verbaux du Bureau des longitudes, consulté le 24 février 2022*. [Online]. Available: <http://purl.oclc.org/net/bdl/items/show/12495>.
- [26] A. A. Michelson, “A plea for light-waves,” *Science*, vol. ns-12, no. 289, pp. 80–81, 1888. DOI: 10.1126/science.ns-12.289.80. eprint: <https://www.science.org/doi/pdf/10.1126/science.ns-12.289.80>. [Online]. Available: <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.ns-12.289.80>.
- [27] A. A. Michelson and E. W. Morley, “Feasibility of establishing a light-wave as the ultimate standard of length,” *American Journal of Science*, vol. s3-38, pp. 181–185, 1889.
- [28] *Edward Williams Morley papers. Library of congress, Manuscript division, 1833-1923*. [Online]. Available: https://findingaids.loc.gov/db/search/xq/searchMfer02.xq?_id=loc.mss.eadmss.ms009263&_faSection=overview&_faSubsection=did&_dmdid=d47892e6.
- [29] Comité International des Poids et Mesures, “Procès-verbaux des séances de 1891,” 1892. [Online]. Available: <https://www.bipm.org/documents/20126/56719035/CIPM1891.pdf/2572f088-b2ca-603f-f51b-f0b273f90b7f?version=1.2&download=true>.
- [30] *B.A Gould to G.Stanley Hall. Clark University Archives, January 16 1892*. [Online]. Available: <https://clarku.libguides.com/archives/>.
- [31] Comité international des poids et mesures, “Procès-verbaux des séances de 1894,” 1895. [Online]. Available: <https://www.bipm.org/documents/20126/56719035/CIPM18.pdf/29e55abe-6a7c-997c-52f6-9358adad5108?version=1.3&t=1633439167258&download=true>.
- [32] I. C. Gardner, “Light waves and length standards*,” *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 45, no. 9, pp. 685–690, Sep. 1955. DOI: 10.1364/JOSA.45.000685. [Online]. Available: <http://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=josa-45-9-685>.
- [33] G. K. Sweetnam, *The Command of Light: Rowland’s School of Physics and the Spectrum*. American Philosophical Society, 1996.
- [34] “Comptes rendus des séances de la onzième conférence générale des poids et mesures,” 1960. [Online]. Available: <https://www.bipm.org/documents/20126/33145685/CGPM11.pdf/c626e1d6-4320-56d3-db37-c6f2a343483b>.

- [35] “Comptes rendus des séances de la dix septieme conférence générale des poids et mesures,” 1983. [Online]. Available: <https://www.bipm.org/documents/20126/33145731/CGPM17.pdf/7a00a9b7-7106-65f2-4cf9-95a733ceb473>.