

La lumière et l'éther au XIX^e siècle

James Lequeux (james.lequeux@obspm.fr)
Observatoire de Paris, LERMA, 61 avenue de l'Observatoire, 75014 Paris

L'article précédent (Jean Eisenstaedt, « Lumière et gravitation, une préhistoire classique de la relativité générale ») a décrit les premières tentatives pour mesurer des variations de la vitesse de la lumière, depuis le XVIII^e siècle jusqu'à Arago au début du XIX^e siècle.

Le présent article continue sur les cent années suivantes, d'Arago à la relativité restreinte d'Einstein au début du XX^e siècle.

Cet article est tiré de deux ouvrages de l'auteur : J. Lequeux, *François Arago, un savant généreux*, Observatoire de Paris et EDP Sciences (2008), et *Hippolyte Fizeau, physicien de la lumière*, EDP Sciences (2014).

Dans le cadre de la théorie corpusculaire d'Isaac Newton, on s'attendait à ce que la déviation de la lumière par un prisme dépende de la vitesse de la lumière incidente. Suivant la méthode proposée par John Michell en 1784, avec un prisme achromatique, François Arago (fig. 1) tenta en 1805-1806 puis en 1810 de mettre en évidence des différences éventuelles dans la vitesse de la lumière provenant de diverses étoiles, ou créées par le mouvement de la Terre sur son orbite pour une même étoile observée à différentes époques de l'année. Mais Arago ne vit aucun effet. Cela plongea longtemps les physiciens contemporains dans la perplexité. Pour sauver la théorie newtonienne, Pierre-Simon Laplace prétendit que les sources lumineuses émettaient des particules avec toute une gamme de vitesses, mais que l'œil humain n'était sensible qu'à des particules ayant une vitesse bien déterminée.

D'autres, comme Arago, commencèrent à mettre sérieusement en doute cette théorie. En 1815, après l'avoir en quelque sorte « découvert », Arago invita à l'Observatoire de Paris Augustin Fresnel (fig. 2), qui était en train d'élaborer sa théorie ondulatoire. Ils travaillèrent ensemble de façon intermittente pendant quatre ans. En 1818, Arago demanda à Fresnel s'il pouvait expliquer le résultat négatif de son expérience dans le cadre de cette théorie. Fresnel produisit une explication assez alambiquée, publiée comme une lettre à Arago dans les *Annales de Chimie et de Physique*, dont ce dernier était un des deux rédacteurs en chef [1]. Elle fait intervenir l'éther, qui



1. François Arago (1786-1853).

était inutile dans la théorie corpusculaire (encore que Newton ne s'en soit pas dispensé), mais qui paraissait nécessaire à la propagation de la lumière dans la théorie ondulatoire.

L'éther matérialisait, si l'on peut dire, le référentiel absolu de la mécanique newtonienne. Si le prisme était immobile par rapport à l'éther, la lumière arrivant avec la vitesse v se propagerait à l'intérieur avec la vitesse v/n , n étant l'indice de réfraction. Mais si le prisme se déplaçait par rapport à la source lumineuse avec la vitesse u parallèlement à la lumière, et si la vitesse de la lumière s'ajoutait algébriquement à celle du prisme, la vitesse à l'intérieur du prisme devrait être $(v/n) + u$. Dans l'idée de Fresnel, ceci correspondrait à un entraînement de l'éther à la vitesse u dans le prisme. Mais on ne peut alors rendre compte du résultat d'Arago. Pour y parvenir, Fresnel dut admettre que la lumière ne se propage à l'intérieur du prisme qu'avec la vitesse $v/n + [1 - (1/n^2)]u$: autrement dit, l'éther ne serait entraîné dans le prisme qu'à la vitesse $[1 - (1/n^2)] u$. C'est ce que Fresnel appelle l'entraînement partiel de l'éther. Le raisonnement



2. Portrait d'Augustin Fresnel (1788-1827).

À droite : Dessin de la lentille de Fresnel du phare de Skerryvore en Écosse, construite en 1841-42 par l'entreprise française de Jean-Jacques François (qui avait travaillé dès le début pour Fresnel). Source : Skerryvore lighthouse.

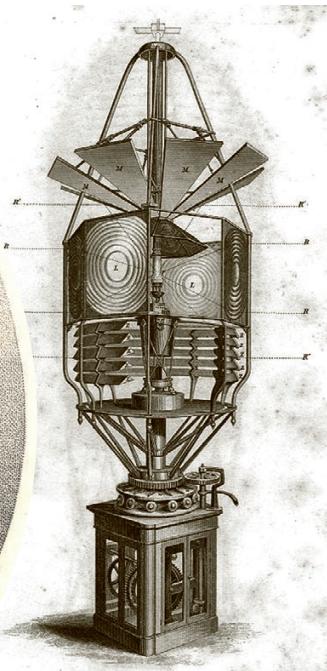
de Fresnel aurait été bien oublié si Hippolyte Fizeau (fig. 3) n'y avait fait allusion dans un article [2] décrivant ses propres travaux.

La figure 4 montre le principe de la remarquable expérience qu'il a réalisée en 1851. La lumière arrivant du Soleil *via* un miroir est concentrée par une lentille cylindrique sur une fente située au foyer d'une lunette, qui en produit donc un faisceau parallèle devant son

objectif ; on place devant l'objectif deux fentes. La lumière issue de chacune de ces fentes parcourt un tube de 1,5 m de long rempli d'eau, puis parvient à une autre lunette munie d'un miroir. Cette lunette renvoie la lumière qui lui parvient d'un des tubes dans l'autre tube, si bien qu'avec le sens indiqué de circulation de l'eau les effets s'ajoutent. Les deux faisceaux lumineux ainsi renvoyés repassent dans les deux fentes, retombent dans la lunette et interfèrent à son foyer. On observe avec l'oculaire les franges d'interférence ainsi formées.

Faisant circuler l'eau en série dans les tubes avec une vitesse de 7 mètres par seconde, Fizeau observe un déplacement des franges de $0,23 \pm 0,04$ frange. Le calcul d'entraînement partiel de la lumière par l'eau adapté de Fresnel prévoyant 0,20 frange, au lieu de 0,40 frange s'il y avait entraînement total, Fizeau conclut que Fresnel avait raison, ou du moins que sa formule était exacte. Remplaçant l'eau par l'air, animé cette fois d'une vitesse de 25 mètres par seconde, Fizeau ne voit aucun déplacement appréciable : or la formule de Fresnel prévoit un déplacement non mesurable de 0,00023 frange, contre 0,41 frange si l'entraînement était total. Ici encore, cette formule est correcte.

Cependant Fizeau a des doutes sur l'interprétation, car il trouve, à juste titre, le raisonnement de Fresnel



« extraordinaire et difficile à admettre ». Quant aux contemporains, leurs doutes portent plutôt sur le résultat d'une expérience aussi difficile. Cependant Michelson et Morley la referont en 1886, confirmant avec une meilleure précision le résultat de Fizeau [3]. Pieter Zeeman la reprendra également en 1914 avec une précision encore accrue, et des lumières de différentes couleurs. Enfin, Chandrashekara Venkata Raman et son collaborateur Nihal Karan Sethi réaliseront en 1922 l'expérience avec l'air en mouvement, détectant marginalement le très faible effet attendu.

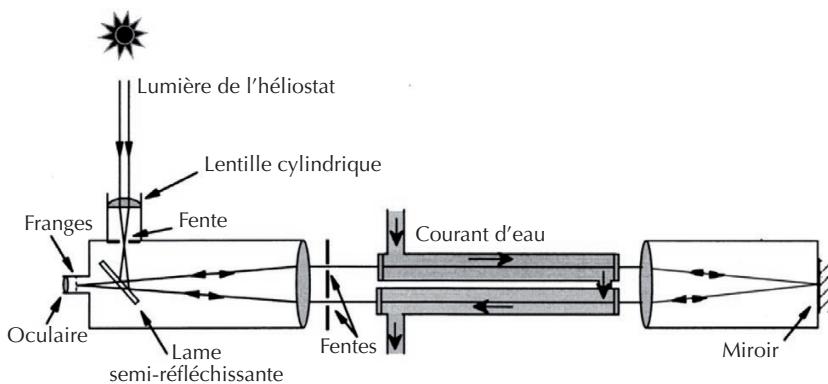
Quant à Fizeau, il va consacrer beaucoup d'efforts à essayer de mesurer l'entraînement de la lumière par des corps en mouvement. Après l'air et l'eau, il considère un corps solide. Il est évidemment impossible de refaire son expérience avec des cylindres de verre lancés à grande vitesse, si bien qu'il décide d'utiliser le mouvement orbital de la Terre. Sa méthode est basée sur le fait que le plan de polarisation d'une lumière polarisée qui traverse une lame transparente inclinée tourne d'un angle qui dépend de l'indice de réfraction du milieu de cette lame. Fizeau estime que si la lame se déplace, la vitesse de la lumière à l'intérieur du verre devrait être légèrement différente, ce qui affecterait la rotation du plan de polarisation. En 1859, il illumine donc la lame (ou plutôt une pile de lames) par la lumière du Soleil renvoyée par un miroir et essaie de voir si la rotation du plan de polarisation varie avec la direction du mouvement de la Terre, donc avec l'heure et la saison. Il croit initialement observer un effet,



3. Armand-Hippolyte-Louis Fizeau (1819-1896), premier président de la Société Française de Physique (1873).

Source : Album de la science, savants illustres, grandes découvertes (1899).





4. L'expérience de Fizeau. Explications dans le texte.

>>>

mais il doit bientôt déchanter, et ses notes se terminent sans conclusion. Si elle avait donné un résultat positif, son expérience aurait permis de déceler le mouvement de la Terre par rapport à l'éther, ce que nous savons aujourd'hui être impossible.

Il avait aussi essayé dès 1852 de mettre en évidence ce déplacement de la Terre par une méthode photométrique. Il écrit : « *Le mouvement de translation de la Terre dans l'espace doit être accompagné selon toutes les probabilités d'un courant de l'Éther lumineux qui existe dans l'intérieur des corps ; ce courant considéré dans l'atmosphère, doit se produire avec une vitesse sensiblement égale à la vitesse de la Terre, mais dans une direction opposée à celle de ce dernier mouvement. Une source de lumière étant placée dans l'atmosphère, les ondes lumineuses qui s'en échappent, se propagent donc dans un milieu en mouvement. La vitesse de ce milieu est 1/10000 de la vitesse de propagation de la lumière. Les ondes seront donc transportées par le milieu éthétré de sorte que dans la direction du courant de l'Éther, la vitesse relative de propagation sera plus grande que dans la direction opposée. Il paraît certain qu'il doit résulter de là que l'intensité de la lumière reçue à des distances égales de la source de lumière, ne doit pas être la même dans les diverses directions.* » Malgré le soin qu'il met à réaliser les mesures différentielles correspondantes, il n'obtient encore une fois aucun résultat positif. Le problème va le hanter longtemps : de 1881 à 1884, il reprend ses expériences avec un véritable acharnement, mais elles sont toujours négatives. Il en restera perturbé jusqu'à son décès en 1896. Bien des physiciens du XIX^e siècle ont été obsédés par cette question.

En 1874, Éléuthère Mascart, qui avait lui-même refait avec le plus grand soin certaines des expériences qui avaient tenté de détecter le mouvement de la Terre par rapport à l'éther, a certainement des doutes sur l'expérience de Fizeau dont les conclusions sont restées en suspens, comme nous l'avons vu. Comme Fizeau est vivant et respecté, Mascart reste prudent. Il termine son mémoire [4] en concluant « *que le mouvement de translation de la Terre n'a aucune influence appréciable sur les phénomènes d'optique produits avec une source terrestre ou avec la lumière solaire, que ces phénomènes ne nous donnent pas le moyen d'apprécier le mouvement absolu d'un corps et que les mouvements relatifs sont les seuls que nous puissions atteindre* ». Selon son biographe Paul Langevin [5], « *c'est là, énoncé pour la première fois, sous forme définitive pour les phénomènes optiques, ce qu'on nomme aujourd'hui le principe de relativité* ».

Puis vient la fameuse expérience de Michelson et Morley, réalisée en 1887 peu après les derniers essais de Fizeau. Ils présentent ainsi leur résultat [6] : « *Il apparaît, d'après tout ce qui précède, raisonnablement certain que s'il existe un mouvement relatif entre la Terre et l'éther lumineux, il doit être petit.* » Ce n'est pas tout à fait la même chose que de dire que l'on ne peut pas détecter le mouvement de la Terre par rapport à l'éther, mais cela revient au même.

L'explication définitive de tous ces résultats négatifs sera donnée en 1905 par la théorie de la relativité d'Albert Einstein. Il publie dans son célèbre article « *Sur l'électrodynamique des corps en mouvement* » [7] la formule relativiste de composition des vitesses :

$v = (u + w) (1 + uv/c^2)^{-1}$, où u et w sont les deux vitesses qui se composent, v la vitesse résultante et c la vitesse de la lumière.

Si l'une de ces vitesses (w) est la vitesse de la lumière, cette équation devient : $v = (u + c) (1 + u/c)^{-1} = c$, ce qui montre que la vitesse de la lumière ne peut être dépassée, et qu'il n'est pas possible de mesurer la vitesse de la Terre en observant la lumière provenant d'une source extérieure.

Deux ans plus tard, Max von Laue démontre la formule de Fresnel en utilisant la composition relativiste des vitesses dans l'expérience de Fizeau [8]. Il conclut son article ainsi : « *de cette façon, nous sommes dispensés de la nécessité d'introduire dans l'optique un éther qui pénètre le corps sans partager son mouvement* ». C'est le début de la mort de l'éther, qui aura cependant la vie dure puisque Einstein ne l'abandonne que quand il formule en 1915 sa théorie de la relativité générale, et qu'il subsiste encore de nombreuses années dans l'esprit de nombreux physiciens. ■

Références

- 1• A. Fresnel, *Annales de chimie et de physique* **9** (1818) 57-66. Le raisonnement de Fresnel est repris et commenté de façon très claire par Pierre Costabel dans *La Vie des Sciences* **6** (1989) 327-334. Ces deux articles sont accessibles sur <http://gallica.bnf.fr>.
- 2• H. Fizeau, *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, **33** (1851) 349-355, accessible sur <http://gallica.bnf.fr>.
- 3• A.A. Michelson et E.W. Morley, *American journal of science* **31** (1886) 377-86, accessible sur http://en.wikisource.org/wiki/Influence_of_Motion_of_the_Medium_on_the_Velocity_of_Light
- 4• E. Mascart, *Annales scientifiques de l'E.N.S.*, 2^e série, **3** (1874) 363-420, accessible sur <http://archive.numdam.org>.
- 5• P. Langevin, *Annales des Mines* (sans date), accessible sur www.annales.org/archives/x/mascart.html
- 6• A.A. Michelson et E.W. Morley, *American journal of science* **34** (1887) 333-45, accessible sur www.aip.org/history/gap/PDF/michelson.pdf
- 7• Pour une traduction en anglais de cet article, voir : [www.fourmilab.ch/etexts/einstein/specrel/www/](http://fourmilab.ch/etexts/einstein/specrel/www/)
- 8• Pour une traduction française commentée de cet article, voir : www.bibnum.education.fr/sites/default/files/Von-Laue-analyse.pdf.