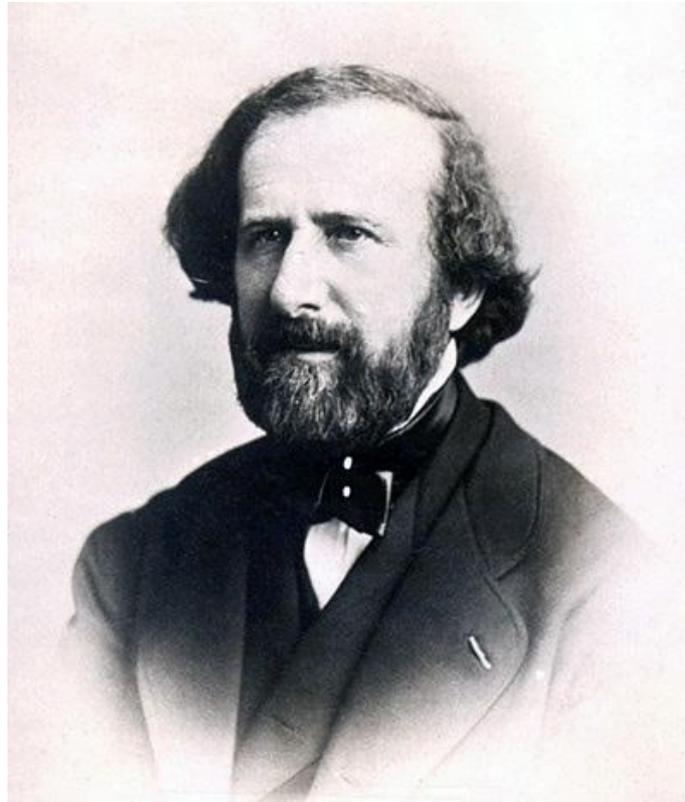


## La mesure du diamètre des étoiles

par James Lequeux  
Astronome émérite à l'Observatoire de Paris



Né dans une famille fortunée, Hippolyte Fizeau (1819-1896) se destine à la médecine pour succéder à son père, professeur à la Faculté de médecine de Paris. Mais il abandonne ses études médicales pour raisons de santé, et se consacre alors à la physique, qu'il peut pratiquer sans aide extérieure ni position académique, grâce à sa fortune. Il s'intéresse au daguerréotype naissant, auquel il apporte de 1840 à 1844 des perfectionnements décisifs. Cela lui donne l'occasion de rencontrer Léon Foucault (1819-1868) avec lequel il va collaborer activement jusqu'en 1850. Ensemble, ils vont réaliser de belles expériences d'interférométrie dans le visible et l'infrarouge, ce qui fait de Fizeau un grand spécialiste de ce domaine. Par ailleurs, Fizeau découvre en 1848, indépendamment de Christian Doppler (1803-1853), le déplacement du spectre lié à la vitesse relative de la source et de l'observateur, l'effet Doppler-Fizeau (mais on oubliera assez vite le nom de Fizeau, à tort car sa contribution est décisive).

En 1849, il mesure directement pour la première fois la vitesse de la lumière, puis avec Eugène Gounelle (1821-1864) la « vitesse de l'électricité » dans les lignes électriques (c'est-à-dire la vitesse de propagation d'une perturbation électrique). C'est le début d'une activité expérimentale foisonnante qui va durer jusqu'en 1852. Qu'on en juge :

- 1850 : comparaison de la vitesse de la lumière dans l'air et dans l'eau, en compétition avec Foucault<sup>1</sup>, ce qui occasionnera leur brouille ;
- 1851 : mesure de la modification de la vitesse de la lumière dans un courant d'eau. Le résultat de cette expérience très délicate sera confirmé par Albert A. Michelson (1852-1931), mais le résultat ne sera expliqué que par la relativité restreinte<sup>2</sup> ;
- 1852 : mesures interférométriques sur l'indice de réfraction de l'air sec et humide, avec le grand appareil d'Arago ; projet de mise en évidence par photométrie du mouvement relatif de la Terre et de l'éther, premières expériences avec un résultat négatif.

@@@@@@

C'est la fin de quatre années de productivité scientifique intense ; par la suite, Fizeau s'acharnera en vain sur ce dernier projet, et fera de belles mesures de dilatation des solides par interférométrie, mais plus rien qui nécessite beaucoup d'imagination.

Par bonheur, une partie des notes de travail de Fizeau est conservée au Musée d'histoire urbaine et sociale de Suresnes<sup>3</sup> ; une autre partie de ces notes a été donnée aux Archives de l'Académie des sciences. C'est dans ce dernier lieu que j'ai découvert le texte qui fait l'objet de cette discussion, qui montre que Fizeau avait compris dès le 22 juin 1851, donc en pleine période de créativité, que l'on pourrait mesurer par interférométrie le diamètre apparent d'une source lumineuse, en particulier d'une étoile. Mais il n'a rien publié, ni déposé de pli cacheté à l'Académie sur ce sujet, sur lequel il reviendra seulement en 1868 sous la forme d'une courte note cachée dans un rapport à l'Académie, dont un extrait est reproduit ci-dessous. Et il laissera à d'autres la mise en œuvre de son idée.

---

1. Les résultats de l'expérience de Foucault (1853) sur le sujet sont commentés dans un article [BibNum](#) : Jean-Jacques Samuëli, « Foucault et la mesure de la vitesse de la lumière dans l'eau et dans l'air », septembre 2009.

2. Voir dans [BibNum](#) un article de Max von Laue (1907), commenté par Jean-Jacques Samuëli et Alexandre Moatti, « L'entraînement partiel de l'éther et la relativité restreinte », novembre 2010.

3. Elle a été donnée à ce musée par un membre de la famille de sa femme en souvenir de sa mesure de la vitesse de la lumière entre la maison de ses parents, située à Suresnes, et Montmartre.

Il existe en effet pour la plupart des phénomènes d'interférence, tels que les franges d'Yung, celles des miroirs de Fresnel et celles qui donnent lieu à la scintillation des étoiles d'après Arago, une relation remarquable et nécessaire entre la dimension des franges et celle de la source lumineuse, en sorte que des franges d'une ténuité extrême ne peuvent prendre naissance que lorsque la source de lumière n'a plus que des dimensions angulaires presque insensibles ; d'où, pour le dire en passant, il est peut-être permis d'espérer qu'en s'appuyant sur ce principe et en formant par exemple, au moyen de deux larges fentes très-écartées, des franges d'interférence au foyer des grands instruments destinés à observer les étoiles, il deviendra possible d'obtenir quelques données nouvelles sur les diamètres angulaires de ces astres.

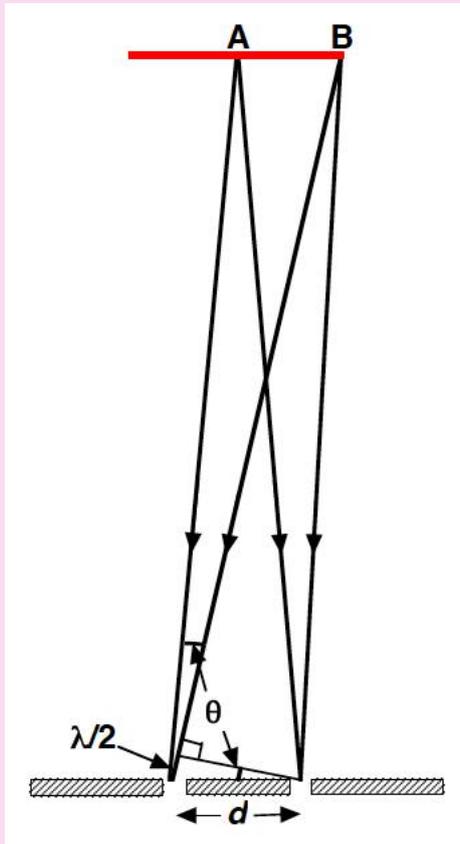
**Figure 1 : Extrait de la note de Fizeau en 1864 au Comptes rendus de l'Académie des sciences.** Note relative au prix Bordin, rapport sur le Concours de l'année 1867, CRAS 66 (1868), p. 932-4 (ici extrait p. 934) (num. BnF/Gallica)

L'idée est très simple, mais il fallait y penser ! Les deux faisceaux issus d'une source ponctuelle à l'infini et ayant passé par les deux trous d'un diaphragme placé devant l'objectif d'une lunette ou d'un télescope forment des franges au foyer. Mais si la source est étendue, chaque point de la source donne son propre système de franges décalées les unes par rapport aux autres, si bien que ces franges s'annihilent partiellement voire totalement. Si la source est un rectangle uniforme, il est facile de comprendre que l'on ne voit plus de franges lorsque la largeur angulaire de ce rectangle est égal à l'interfrange  $\lambda/d$ , où  $\lambda$  est la longueur d'onde d'observation et  $d$  l'écartement entre les trous du diaphragme. Mais les étoiles sont plutôt des disques uniformes, et on peut montrer les franges disparaissent alors lorsque le diamètre apparent de l'étoile visée atteint  $1,22 \lambda/d$ .

### **Interférences dues à la largeur de la source**

On observe avec un télescope muni d'un diaphragme portant deux trous distants de  $d$  une source uniforme (en rouge). Si la source avait un diamètre apparent très petit, les rayons provenant de ses différents points arriveraient pratiquement en phase sur les deux trous et on observerait des franges d'interférence (trous d'Young). Mais si le diamètre apparent est plus grand, il y a destruction partielle des interférences. La figure est dessinée dans le cas où la destruction est totale : les rayons provenant du milieu A de la source arrivent en phase sur les deux trous, mais ceux qui arrivent du bord B arrivent déphasés de  $\lambda/2$  et détruisent les franges provenant de A. Ceci se produit pour

tous les couples de points de la source séparés angulairement de  $\theta = \lambda/2d$ , soit pour une largeur angulaire de la source de  $\lambda/d$ , condition pour qu'il n'y ait pas de franges.



@@@@@@

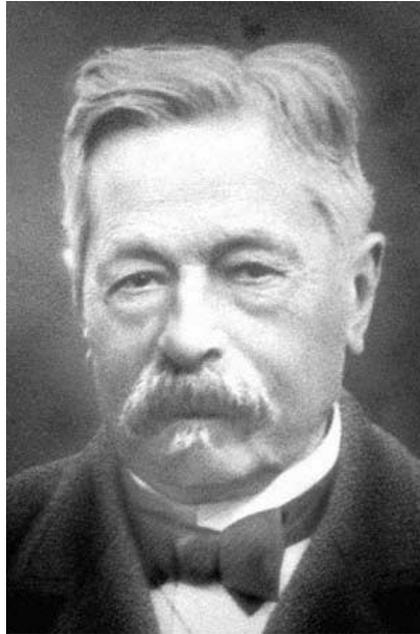
On ignore comment Édouard Stephan (1837-1923), qui dirige depuis 1866 l'observatoire de Marseille, prend connaissance de cette idée et entre en contact avec Fizeau. Toujours est-il qu'il dispose du plus grand télescope de l'époque, construit par Foucault, dont le diamètre est de 80 cm. Il place sur le miroir un diaphragme qui laisse à découvert deux lunules dont les centres sont distants de 65 cm, et observe visuellement en 1873 et 1874 la plupart des étoiles brillantes accessibles. Toutes lui donnent au foyer des franges d'interférence très nettes, et ne sont donc pas résolues par l'interféromètre. C'est un résultat un peu décevant mais néanmoins très important, car on n'a aucune idée à l'époque des dimensions des étoiles. Stephan écrit à Fizeau le 1<sup>er</sup> février 1874 :

*Ainsi, le diamètre apparent de toutes les étoiles observées est considérablement inférieur à 1/6 de seconde d'arc.*

*Si je ne me trompe, c'est là une notion bien acquise et la première qui ait encore été obtenue sur la matière. Un tel résultat n'est pas sans importance. D'ailleurs, il n'infirme nullement l'espoir que nous avons conçu de mettre en évidence le diamètre de certaines étoiles. Le principe*

*de la méthode subsiste, l'instrument est encore trop petit, voilà tout. Il sera bien intéressant de voir ce que donnera le télescope de 1m,20 actuellement en construction à Paris.*

Le télescope de 1m20 ne donnera rien non plus.



**Figure 2 :** *Édouard Stephan (1837-1923), normalien, astronome français, directeur de l'Observatoire de Marseille de 1866 à 1907.*

Cependant, Michelson travaille sur le même problème aux États-Unis. En 1890 et 1891, il publie deux articles où il explique que l'on peut mesurer avec précision le diamètre apparent des astres en plaçant deux fentes devant l'objectif d'une lunette et en examinant les franges d'interférence ainsi produites. C'est la même idée que celle de Fizeau : mais il ne le cite nulle part, ni d'ailleurs Stephan. C'est un peu surprenant, car Michelson a une grande admiration pour Fizeau dont il a reproduit l'expérience très difficile sur la vitesse de la lumière dans l'eau en mouvement. Quoiqu'il en soit, ses articles indiquent le principe et contiennent des calculs très complets, introduisant la *fonction de visibilité* des franges, qui donne leur intensité en fonction de l'écartement des fentes lors de l'observation d'une source donnée<sup>4</sup>. Utilisant la lunette de 30 cm de diamètre de l'observatoire Lick, Michelson applique avec succès la méthode à la mesure du diamètre apparent des satellites de Jupiter – compte tenu de leur distance relativement petite, la tâche était plus aisée que la mesure du diamètre apparent des étoiles.

---

4. Cette fonction de visibilité est la transformée de Fourier de la distribution de brillance sur la source, mais on ne parle pas encore de transformée de Fourier.

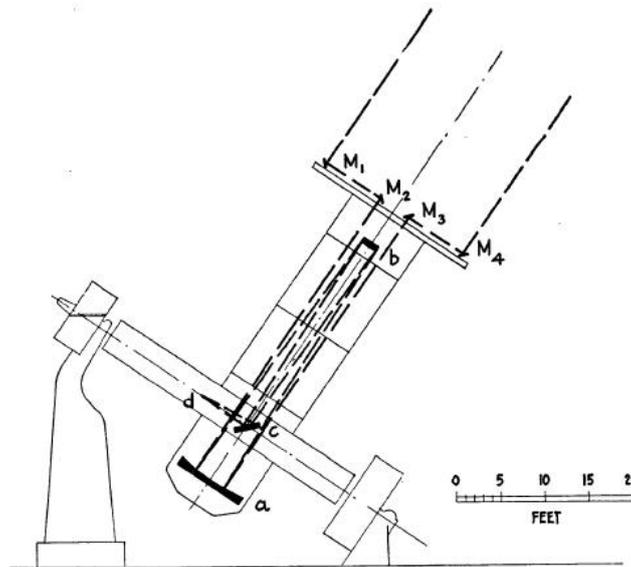


**Figure 3 : Observatoire Lick, Mount Hamilton, San Jose, Californie.** Vue du bâtiment principal d'origine. L'observatoire a été construit à partir des années 1880.  
Photo Jane Lidz — National Park Service.

Un peu plus tard, en 1895, Karl Schwarzschild (1873-1916) mesure à Munich, par une méthode analogue, l'écartement entre les composantes d'étoiles doubles. En 1898, Maurice Hamy (1861-1936), précisant les calculs de Michelson, reprend ses mesures sur les satellites de Jupiter avec le Grand Équatorial Coudé de l'Observatoire de Paris, dont le diamètre est de 60 cm. Plus rien ne se passe jusqu'à ce qu'en 1919 Michelson et son associé Francis G. Pease (1881-1938) reçoivent des fonds pour mesurer par interférométrie le diamètre de l'étoile Bételgeuse ( $\alpha$  Orionis). La connaissance des étoiles s'est considérablement améliorée depuis le siècle précédent : Max Planck (1858-1947) avait publié en 1900 sa théorie du corps noir, grâce à laquelle on peut se faire une idée du diamètre apparent d'une étoile si on connaît son éclat et la température de sa surface<sup>5</sup>. Mais on ne connaît à l'époque la température de quelques étoiles seulement, et pas celle de Bételgeuse, faute d'observations dans l'infrarouge : c'est la motivation de la mesure interférométrique que font en 1920 Michelson et Pease au télescope du Mont Wilson en Californie, sur lequel ils ont adapté un système de miroirs plans semblable à celui qu'avait imaginé Fizeau en

5. Le flux reçu par unité de fréquence à la fréquence  $\nu$  est  $f_\nu = B_\nu \Omega$ , où  $\Omega$  est l'angle solide sous-tendu par l'étoile et  $B_\nu$  sa luminance à la fréquence  $\nu$  et à la température absolue  $T$ , qui est donnée par la formule de Planck  $B_\nu = (2h\nu^3/c^2)[\exp(h\nu/kT) - 1]^{-1}$ . Du flux, on peut donc déduire  $\Omega$  et donc le diamètre apparent.

1851 afin d'augmenter la longueur de la base et la faire varier (cf. figure ci-dessous). Ils trouvent un diamètre apparent de 0,047 secondes de degré, confirmé par les mesures actuelles.



**Figure 4 :** Schéma de l'appareillage utilisé par Michelson et Pease au télescope de 2,50 m de diamètre du Mont Wilson pour mesurer le diamètre de Bételgeuse.

Les miroirs à 45°  $M_1$  et  $M_4$ , dont l'écartement est réglable, définissent la base de l'interféromètre. Ils renvoient la lumière de l'étoile vers les miroirs  $M_2$  et  $M_3$ , lesquels l'envoient sur le miroir primaire a du télescope. Les faisceaux sont alors renvoyés sur le miroir secondaire convexe b, puis sur le miroir à 45° c qui les dirige le long de l'axe polaire du télescope. Les franges sont observées en d.

Pease va observer seul le diamètre apparent d'Arcturus ( $\alpha$  Bootis) avec le même appareillage, tandis que John A. Anderson (1876-1959) utilise également le télescope de 2,50 m pour étudier des étoiles doubles avec deux fentes d'écartement variable, prolongeant ainsi les mesures de Schwarzschild.

Puis plus rien jusqu'en 1956, malgré les efforts désespérés de Pease pour construire et utiliser un interféromètre à plus grande base. Cependant, l'interférométrie a fait entre temps d'énormes progrès pour l'étude de la structure des sources célestes d'ondes radio, c'est-à-dire en radioastronomie. Des techniques très élaborées permettent alors d'utiliser de nombreuses antennes en interférométrie et de faire de véritables images avec une haute résolution angulaire. C'est un radioastronome britannique, Robert Hanbury Brown (1916-2002) qui, avec son compatriote, le génial physicien amateur Richard Q. Twiss (1925-2005), reprend le flambeau de l'interférométrie optique en utilisant une technique développée en radio : l'interférométrie d'intensité. Ici, on se contente de recevoir le signal de l'étoile avec deux télescopes. Un récepteur photoélectrique (photomultiplicateur) reçoit ce signal de chaque côté, et un

dispositif électronique central mesure la corrélation entre les signaux issus de ces deux détecteurs, laquelle est positive lorsque le diamètre apparent de l'étoile est plus petit que  $1,22 \lambda/d$ , comme pour l'interférométrie classique. Bien que les physiciens aient initialement du mal à comprendre les processus impliqués<sup>6</sup>, cela fonctionne et les deux scientifiques réussissent ainsi à mesurer en 1956 le diamètre apparent de Sirius. Ceci va les encourager à construire en Australie un grand interféromètre d'intensité avec lequel ils mesureront avec une très bonne précision le diamètre apparent de 32 étoiles.



**Figure 5 :** *Robert Hanbury Brown (1916-2002), astronome britannique, FRS Fellow of the Royal Society.*

Cependant l'interférométrie d'intensité est très peu sensible, et ses auteurs eux-mêmes considèrent qu'elle n'a pas d'avenir. Il faudra encore attendre 1974 pour qu'Antoine Labeyrie reprenne en France la technique interférentielle de Michelson, cette fois avec deux petits télescopes entre lesquels on fait des franges d'interférence, les chemins optiques étant égalisés en déplaçant la table où se forment les franges. Plus tard, cette égalisation se fera par des lignes à retard optiques. Depuis cette date, les techniques interférométriques en optique se sont prodigieusement développées, et une douzaine d'interféromètres à plusieurs télescopes mobiles ont été construits. Ils permettent d'obtenir de véritables images à deux dimensions, notamment des images de la surface et de l'environnement d'étoiles supergéantes. Ils fonctionnent généralement dans l'infrarouge proche ou moyen, où les difficultés techniques sont moins grandes qu'en lumière visible et où la turbulence atmosphérique est moins gênante. L'un

---

6. Ceci sera expliqué plus tard par la corrélation Bose-Einstein des photons, voir p. ex. [page](#) Wikipédia `{{en}}`.

d'eux est le Very Large Telescope Interferometer (VLTI) de l'Observatoire Européen Austral, dont les quatre télescopes mobiles de 1,8 m de diamètre peuvent être combinés avec les quatre télescopes fixes de 8 m. L'idée de Fizeau a porté de remarquables fruits !



*(juillet 2014)*



***Figure 6 : Observatoire ESO, désert d'Atacama, 2635 m, Chili (depuis 2000).***  
*Plateforme VLT, avec UT1 (Unit Telescop 1) à UT4 – diamètre 8m chacun ; trois des quatre télescopes auxiliaires AT- diamètre 1,8m chacun ; entre UT3 et UT4, au fond, le télescope VST.*