

# Les mesures de vitesse de la lumière



## 6. La vitesse de la lumière et la relativité restreinte

◆ On s'est depuis longtemps posé la question de la constance de la vitesse de la lumière. Pour les tenants de la théorie corpusculaire de la lumière de Newton, pour lequel la lumière était faite de corpuscules ayant une masse, rien ne s'opposait à ce que la vitesse de la lumière soit différente d'une source à l'autre. En particulier l'anglais John Michell (c. 1724-1783) avait imaginé que les corpuscules de lumière émis par une étoile pourraient être ralentis par l'attraction gravitationnelle de cette étoile : la vitesse de la lumière pourrait donc être plus ou moins grande selon la masse et le rayon de l'étoile. Par ailleurs, on pensait, assez logiquement dans cette théorie, que la vitesse de la lumière devait se combiner avec celle de la source ou de l'observateur : ainsi on s'attendait à ce que la vitesse de la lumière d'une étoile donnée soit plus grande lorsque la Terre s'en approchait que lorsqu'elle s'en éloignait, et varie donc au cours de l'année. Comment le vérifier ? Toujours dans cette théorie, la lumière aurait été plus ou moins déviée par un prisme selon sa vitesse. François Arago (1786-1853) observa donc en 1806 puis en 1809-1810 la déviation par un prisme de la lumière de différentes étoiles à différentes époques de l'année, sans voir aucun effet. Ceci le conduisit à abandonner la théorie de Newton pour se rallier à la théorie ondulatoire que son ami Augustin Fresnel (1788-1827) était en train de développer. Mais même si l'on pouvait penser que les étoiles émettaient toutes la lumière avec la même vitesse, éliminant ainsi un des problèmes, pourquoi ne voyait-on aucune différence dans la déviation de leur lumière par le prisme au cours de l'année ? Le prisme s'éloignant ou se rapprochant de l'étoile en fonction de la saison, on aurait peut-être dû voir la vitesse varier. Arago demanda à Fresnel de se pencher sur la question, et celui-ci aboutit à une conclusion surprenante : l'éther, le milieu dans lequel la lumière était alors censée se propager, n'aurait été que partiellement entraîné par la Terre (et le prisme) de façon à ce que la déviation par le prisme ne change pas. Au lieu d'être entraîné avec la vitesse  $u$  de la Terre sur son orbite, auquel cas cette vitesse se serait simplement ajoutée à celle de la lumière (du moins c'est ce qu'on pensait à l'époque), l'éther n'aurait été entraîné qu'avec la vitesse  $u(1-v^2/c^2)$ , où  $c$  est la vitesse de la lumière dans le vide et  $v$  sa vitesse dans le verre du prisme. Les physiciens trouvèrent en général cela peu convaincant, et ni Fresnel ni Arago eux-mêmes ne paraissent avoir été convaincus.

◆ Les choses en restèrent là jusqu'à ce qu'Hippolyte Fizeau (1819-1896) réalise en 1851, peut-être à l'instigation d'Arago, une

nouvelle expérience sur l'entraînement de la lumière par un corps transparent mobile. Son principe est représenté Fig. 1.

◆ L'expérience donna cette fois un résultat positif : Fizeau observa effectivement le petit déplacement des franges prévu par la formule de Fresnel (l'expérience diffère cependant des observations d'Arago en ce que l'eau se déplace par rapport à l'observateur, tandis que dans les observations d'Arago le prisme était immobile par rapport à celui-ci). Fizeau resta sceptique sur la théorie de Fresnel, écrivant en conclusion de son article :

*Le succès de cette expérience me semble devoir entraîner l'adoption de l'hypothèse de Fresnel, ou du moins de la loi qu'il a trouvée pour exprimer le changement de la vitesse de la lumière par l'effet du mouvement des corps ; car bien que cette loi se trouvant véritable [vérifiée], cela soit une preuve très-forte en faveur de l'hypothèse dont elle n'est qu'une conséquence, peut-être la conception de Fresnel paraîtra si extraordinaire, et, sous quelques rapports, difficile à admettre, que l'on exigera d'autres preuves encore, et un examen approfondi de la part des géomètres [théoriciens], avant de l'adopter comme expression de la réalité des choses.*

◆ L'expérience de Fizeau a été répétée plusieurs fois avec des résultats concordants, notamment par Albert A. Michelson (1852-1931) et Edward W. Morley (1838-1923) qui ont vérifié l'effet avec une grande précision. Michelson et Morley ont réalisé en 1881, puis refait en 1887, une autre expérience plus célèbre par laquelle ils ont observé qu'« il [était] impossible de détecter le mouvement de la Terre par rapport à l'éther ». Cette expérience, puis d'autres utilisant des moyens plus modernes, ont montré, en termes simples, que la vitesse de la lumière dans le vide ne dépend pas de la vitesse de l'observateur. Il revint à Albert Einstein (1879-1955) d'expliquer tous ces phénomènes par la théorie de la relativité restreinte, en abandonnant à ce propos l'éther, qui paraissait jusque là un support nécessaire pour assurer la propagation de la lumière mais qui avait «empoisonné» toute la physique depuis le XVII<sup>e</sup> siècle. Le postulat fondamental de cette théorie est l'invariance de la vitesse de la lumière dans le vide. On en déduit que si les vitesses s'additionnent simplement si elles sont faibles devant celle de la lumière (Einstein donnait l'image de la vache marchant dans un train en mouvement), ceci n'est plus vrai si elles sont très grandes. Le postulat explique d'emblée les résultats négatifs d'Arago : la lumière arrivait sur son prisme avec la même vitesse quelles que

soient les circonstances\*. Les expériences de Michelson et Morley et de leurs successeurs s'expliquent de la même façon. L'interprétation de l'expérience de Fizeau est plus subtile : en effet la lumière a une vitesse inférieure à  $c$  dans l'eau, et sa vitesse peut se composer avec la vitesse de l'eau. Un calcul relativiste montre que si  $v$  est la vitesse de la lumière dans l'eau au repos ( $v = c/n$  où  $n$  est l'indice de réfraction de l'eau), et que si l'eau se déplace elle-même dans la direction de la lumière avec la vitesse  $u$ , la vitesse résultante  $V$  de la lumière par rapport à un observateur au repos est :

$$V = (v + u) / (1 + uv/c^2)$$

Le lecteur expert en mathématiques pourra vérifier 1) que  $V$  est égal à  $c$  quel que soit  $u$  si  $v = c$ , conformément au principe de relativité et 2) que la formule donnée par Fresnel et Fizeau, qui suit, est en accord au premier ordre en  $u/c$  avec la formule relativiste,  $u$  étant beaucoup plus petit que  $v$  et  $c$  :

$$V = v + u(1 - v^2/c^2),$$

alors que si les vitesses s'étaient simplement additionnées on aurait eu  $V = v + u$ , ce qui est très différent.

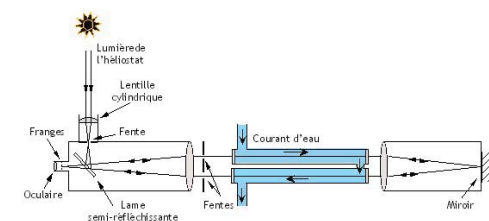


Figure 4.6. L'expérience de Fizeau. La lumière arrivant du Soleil via un héliostat est concentrée sur une fente située au foyer d'une lunette, qui en produit donc un faisceau parallèle devant son objectif ; on place devant l'objectif deux fentes. La lumière issue de chacune de ces fentes parcourt un tube de 1,5 m de long rempli d'eau, puis arrive 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 première lunette et interfèrent à son foyer. On observe avec l'oculaire les franges d'interférence ainsi formées.

\* En toute rigueur, il faudrait tenir compte du fait que le prisme était dans l'air, et non dans le vide. Mais la différence est imperceptible.