

Les expériences d'Arago sur la vitesse de la lumière (1810)

par James Lequeux, astrophysicien, chercheur honoraire à l'Observatoire de Paris, commissaire de l'exposition consacrée à Arago à l'occasion du 150^e anniversaire de sa mort (2003 , www.arago.science.gouv.fr)

Nommé en 1805 secrétaire-bibliothécaire de l'Observatoire de Paris, Arago commence aussitôt des expériences sur la réfraction des gaz sous la responsabilité de Biot et participe à l'activité proprement astronomique de l'Observatoire : mesures de positions d'étoiles pour préciser la latitude de Paris, réduction de données pour la détermination d'orbites de comètes.

Il s'intéresse aussi à la vitesse de la lumière, peut-être à l'instigation de Laplace. Il cherche à voir si la vitesse de la lumière est différente d'une étoile à l'autre. D'autre part, il essaye de détecter une variation éventuelle de la vitesse de la lumière lorsque la Terre se rapproche ou s'éloigne de l'étoile. Il fait dans le dernier cas l'hypothèse implicite, qui est alors considérée comme évidente par tous, que la vitesse de la Terre s'ajoute ou se retranche simplement à la vitesse de la lumière (la relativité restreinte nous a montré que c'est faux, la vitesse de la lumière dans le vide étant constante). Arago doit donc chercher dans le premier cas si l'angle de déviation par un prisme de la lumière de l'étoile change d'une étoile à l'autre, et dans le deuxième cas si cet angle varie à différentes époques de l'année pour une même étoile, la vitesse de la Terre étant alors orientée différemment par rapport à la direction de l'étoile.

Le travail d'Arago est décrit dans un mémoire présenté à l'Institut le 10 décembre 1810, mais non publié ; il l'a retrouvé peu avant sa mort en 1853 et fait publier par l'Académie des sciences « sans en changer un seul mot »¹. Il y écrit :

Si on se rappelle que la déviation qu'éprouvent les rayons lumineux en pénétrant obliquement dans les corps diaphanes est une fonction déterminée de leur vitesse primitive², on verra que l'observation de la

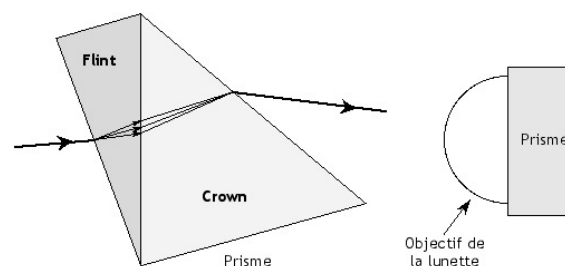
¹ CRAS 36 (1853) p. 38-49 ; OC t. 7, p. 548-568.

² Dans la théorie corpusculaire de la lumière, sur laquelle est basée l'article, on imagine pour expliquer la réfraction que les « corpuscules de lumière » subissent une accélération brutale en pénétrant dans un corps

déviations totales à laquelle ils sont assujettis en traversant un prisme fournit une mesure naturelle de leur vitesse.

En 1805-1806, Arago expérimente avec un prisme d'angle $45'$, dont la dispersion est suffisamment petite pour lui permettre de travailler en lumière blanche. Il observe avec et sans prisme des sources artificielles de lumière, des étoiles, le Soleil, la Lune, les planètes. Il constate que la déviation de leur lumière par le prisme est toujours égale à $25'$, avec des écarts de 5 secondes de degré au plus, qu'il considère avec raison comme dus aux erreurs de mesure. Il en déduit que les variations de la vitesse de la lumière ne dépassent pas $1/480^\circ$. L'existence de grandes variations de la vitesse de la lumière d'une étoile à l'autre est donc fortement mise en doute. Ce résultat fait grand bruit car il paraît en contradiction avec la théorie corpusculaire.

Arago est alors envoyé mesurer le méridien de Barcelone aux îles Baléares, et l'affaire reste en suspens jusqu'à son retour en 1809. À ce moment, le mémoire dans lequel il avait décrit en 1806 ses premières observations n'avait pas encore été examiné par un rapporteur. Aussi Delambre s'empresse-t-il de présenter un rapport sur ce mémoire à la Première classe de l'Institut (le nom provisoire de l'Académie des sciences) le 4 septembre 1809 : le travail d'Arago est certainement un des éléments qui ont favorisé son élection à l'Institut deux semaines plus tard. Arago décide alors de faire de nouvelles mesures avec un prisme de plus grand angle, mesures qui ont lieu principalement en 1810. Comme cette fois la dispersion du prisme devient gênante si l'on observe en lumière blanche, mais qu'il a besoin de cette lumière pour faire des mesures précises, Arago fait construire un prisme achromatique, c'est-à-dire de dispersion négligeable, pour pouvoir travailler en lumière blanche (Fig. 1).



réfringent, et que cette accélération est constante, indépendante de leur vitesse primitive : en conséquence, on pense que le rapport entre la vitesse avant et après n'est pas indépendant de la vitesse initiale, et que l'angle dont le rayon est dévié dépend donc de cette vitesse. On pense donc pouvoir mesurer la vitesse initiale de la lumière en observant la déviation donnée par le prisme.

Figure 1. Le prisme achromatique d'Arago.

La lumière entre dans un prisme de verre flint, où elle est dispersée de façon différente selon sa couleur, puis dans un prisme de crown collé au précédent, qui corrige la dispersion du flint ; finalement, l'angle dont la lumière est déviée est le même quelle que soit sa couleur, ce qui permet d'observer en lumière blanche. On ne sait pas quelle orientation avait le prisme par rapport à la lumière incidente. Dans sa dernière série d'observations, Arago plaçait une série de deux prismes achromatiques collés ensemble devant la moitié de l'objectif d'une lunette, comme indiqué à droite.

Le prisme achromatique, qui donne une déviation d'un peu plus de 10° , est fixé devant l'objectif de la lunette d'un cercle méridien mural, ce qui fait que les étoiles sont observées à leur passage au méridien. Le prisme peut tourner sur lui-même et se déplacer latéralement. Arago fait des mesures, avec et sans prisme, de la distance angulaire au zénith de diverses étoiles au moment de leur passage au méridien (Fig. 2). Il répète ces mesures à différentes époques de l'année. Il trouve que les déviations par le prisme ainsi mesurées ne présentent que de très faibles différences d'une étoile à l'autre, qu'il attribue aux erreurs de mesure. Pour diminuer leur effet, il fait néanmoins construire un autre prisme.

Cette fois encore, aucune différence significative n'est trouvée d'une étoile à l'autre. La vitesse de la lumière ne semble pas dépendre des propriétés de l'étoile émettrice. Par ailleurs, si la vitesse de la lumière s'était composée simplement avec celle de la Terre, Arago aurait pu détecter facilement l'effet de ce mouvement sur la vitesse de la lumière : il aurait produit à deux périodes opposées de l'année une déviation atteignant, pour les étoiles proches de l'écliptique, $6''$ avec le prisme achromatique simple et $14''$ avec le prisme double. Il n'a rien observé de tel.

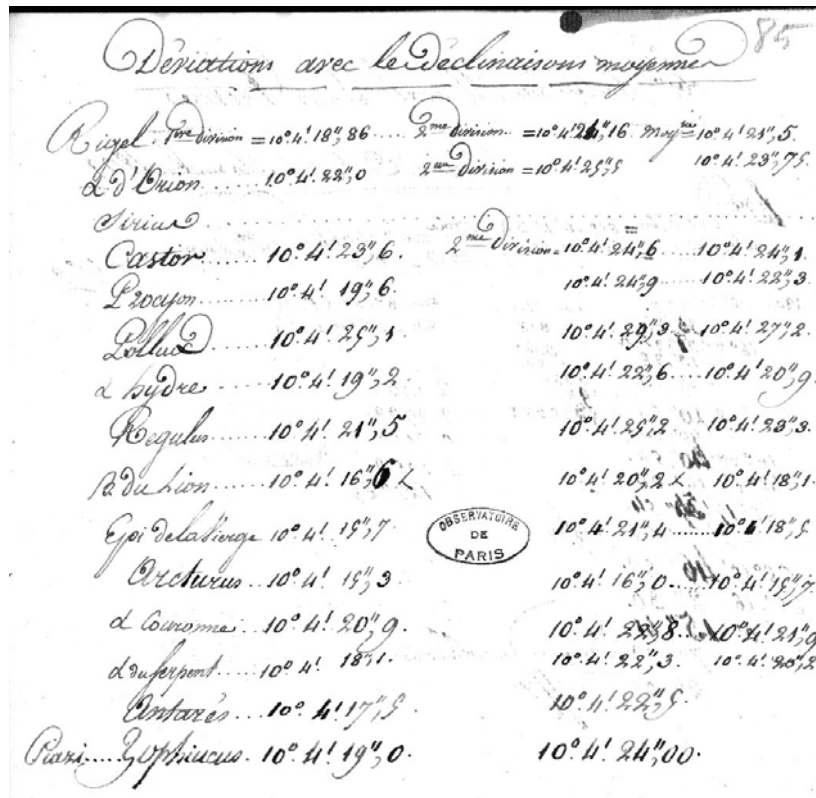


Figure 2

Page d'un cahier autographe d'Arago où il reporte le résultat final de ses premières mesures avec le prisme achromatique. Il y indique la différence de déclinaison de diverses étoiles mesurée avec et sans prisme avec les deux divisions opposées d'un cercle mural, puis leur moyenne, c'est-à-dire la déviation de ce prisme. On voit que les différences d'une étoile à l'autre ne sont que de quelques secondes de degré, dues seulement aux erreurs de mesure.



Figure 3. Le cercle répéteur de Fortin de l'Observatoire de Paris.

Arago et Laplace sont perplexes devant ces résultats. Ils hésitent entre deux explications : soit la théorie newtonienne est fautive et la vitesse de la lumière est constante, soit l'œil ne peut percevoir que des « grains de lumière » ayant une vitesse donnée. C'est la seconde hypothèse qu'ils retiennent.

Arago écrit en effet :

Il semble [...] qu'on ne peut rendre raison [de l'observation] qu'en supposant que les corps lumineux émettent des rayons avec toutes sortes de vitesses, pourvu qu'on admette également que ces rayons ne sont visibles que lorsque leurs vitesses sont comprises entre des limites déterminées. Dans cette hypothèse, en effet, la visibilité des rayons dépendra de leurs vitesses relatives, et, comme ces mêmes vitesses déterminent la quantité de la réfraction, les rayons visibles seront toujours également réfractés.

Ils en tirent une conséquence assez inattendue, mais qui montre qu'ils soupçonnent que les rayonnements infrarouge et ultraviolet sont de même nature que la lumière, ce qui est loin d'être évident à l'époque :

Il ne sera peut-être pas inutile de noter que les observations dont je viens de rendre compte et la supposition qui les explique se lient d'une manière très remarquable aux expériences de Herschel, Wollaston et Ritter. Le premier a trouvé, comme on sait, qu'il y a en dehors du spectre prismatique et du côté rouge, des rayons invisibles, mais qui possèdent à un plus haut degré que les rayons lumineux la propriété d'échauffer ; les deux autres physiciens ont reconnu, à peu près dans le même temps, que du côté du violet il y a des rayons invisibles et sans chaleur, mais dont l'action chimique sur le muriate [chlorure] d'argent et sur plusieurs autres substances est très sensible [bien entendu, il s'agit respectivement de l'infrarouge et de l'ultraviolet]. Ces derniers rayons ne forment-ils pas la classe de ceux auxquels il ne manque qu'une petite augmentation de vitesse pour devenir visibles, et les rayons calorifiques ne seraient-ils pas ceux qu'une trop grande vitesse a déjà privés de la propriété d'éclairer ?

Quoi qu'il en soit, les observations d'Arago ont jeté le trouble chez les partisans de la théorie newtonienne. Arago en fait encore partie, mais plus pour longtemps. Alexandre de Humboldt s'en est fait l'écho dans sa préface aux Œuvres complètes d'Arago³ :

Au moyen de l'application d'un prisme à l'objectif d'une lunette, [Arago] avait prouvé non-seulement que les mêmes tables de réfraction peuvent servir pour la lumière qui émane du Soleil et pour celle qui nous vient des étoiles [voici au moins une application pratique des observations d'Arago], mais en outre, ce qui jetait déjà bien des doutes sur la théorie de l'émission, que les rayons des étoiles vers lesquelles marche la terre, et les rayons des étoiles dont la terre s'éloigne, se réfractent exactement de la même quantité. Pour concilier

³OC t. 1, p. I-XXXII.

ce résultat, obtenu à la suite d'observations très délicates, avec l'hypothèse newtonienne, il aurait fallu admettre que les corps lumineux émettent des rayons de toutes les vitesses, et que les seuls rayons d'une vitesse déterminée sont visibles, qu'eux seuls produisent dans l'œil la sensation de lumière.

Arago mentionne d'autres propositions d'expériences liées à l'aberration destinées à rechercher des différences dans la vitesse de la lumière, qui consistent à observer la position des étoiles avec une lunette remplie d'eau. Dues à Rudjer, puis à Alexander Wilson et reprises encore dans la seconde moitié du XIX^e siècle par l'astronome anglais Airy et par d'autres encore, elles n'ont pas plus abouti que les siennes.

Perturbé par son résultat, Arago, qui est de plus en plus persuadé de la validité de la théorie ondulatoire, se tourne vers son ami Fresnel pour lui demander d'essayer d'interpréter ses observations dans le cadre de cette théorie. Le travail de Fresnel est publié en 1818 dans les *Annales de Chimie et de Physique*⁴ sous la forme d'une lettre à Arago. Fresnel comprend que la vitesse de la lumière dans le prisme d'Arago ne s'additionne pas simplement avec la vitesse u de la Terre : ceci préfigure dans une certaine mesure la relativité restreinte. Il exprime ceci en disant que l'éther dans le prisme en mouvement n'acquiert pas la vitesse u , mais n'y est entraîné que partiellement avec la vitesse $u \times (1 - 1/n^2)$, n étant l'indice de réfraction du verre du prisme.

Mais Arago cesse de s'intéresser au problème, car il est engagé dans des travaux avec Ampère concernant l'électromagnétisme. On se serait attendu à ce qu'il en ait dit quelques mots en présentant en 1853 son article de 1810, mais il n'en est rien. L'hypothèse de l'« entraînement partiel » de l'éther, émise par Fresnel pour expliquer le résultat de l'expérience d'Arago de 1810, aurait été complètement oubliée si Fizeau n'avait fait allusion au texte de Fresnel à propos de son expérience de 1849.

Quoi qu'il en soit, même si elles ont été réalisées dans le cadre de la théorie corpusculaire de la lumière, même si leur relation écrite n'a été faite qu'en 1853, les expériences d'Arago de 1810 restent un jalon fondamental dans la connaissance de la nature de la lumière et dans la validation de la théorie de la relativité restreinte de 1905.

⁴ ACP 19 (1818) p. 57, reproduit dans Fresnel (1866, 1868, 1870) t. 1, p. 627-636.