

AUX ORIGINES DE L'OPTIQUE PHYSIQUE

Arago et Fresnel

Conférence donnée par **James LEQUEUX**
Astronome à l'Observatoire de Paris-Meudon
Dans le cadre de l'année mondiale de la physique

Huygens contre Newton



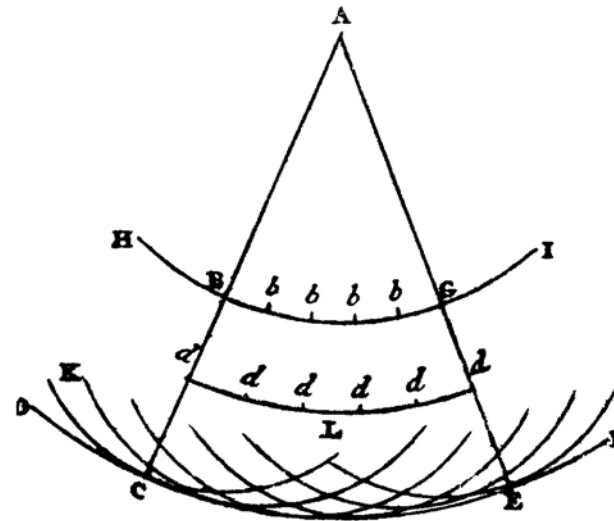
- Pour Christiaan Huygens (1629-1695) la lumière était une onde se propageant dans l'éther. (1690) : théorie ondulatoire



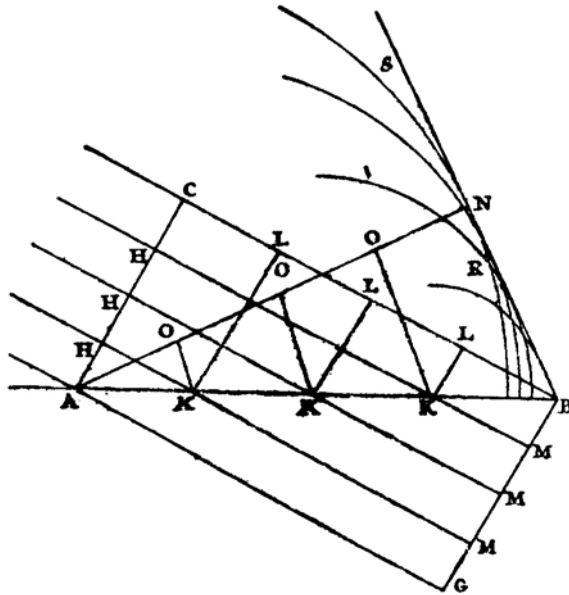
- Pour Isaac Newton (1642-1727) la lumière était faite de corpuscules massifs (1687 à 1704) : théorie corpusculaire ou émissionniste.

Le principe d'Huygens-Fresnel

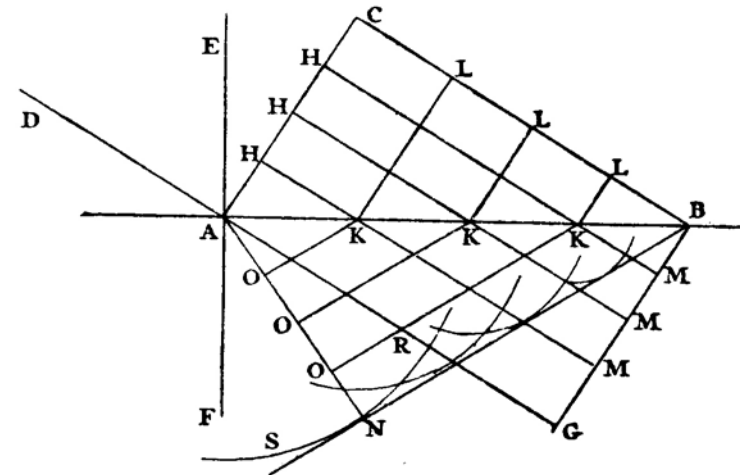
- Énoncé de Fresnel : *Les vibrations d'une onde lumineuse dans chacun de ses points sont égales à la somme de tous les mouvements élémentaires qu'y enverrait au même instant, en agissant isolément, chaque petite partie de cette onde considérée dans une quelconque de ses positions antérieures.*



Huygens explique la réflexion et la réfraction



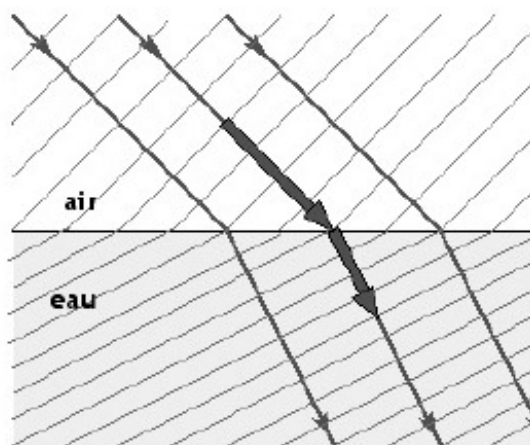
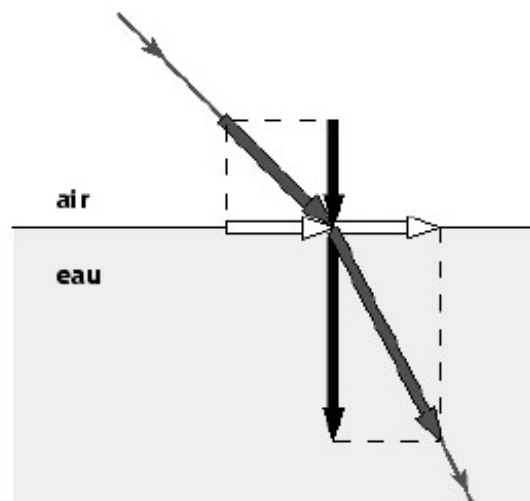
- Les plans d'onde incidents équidistants AC et KL atteignent la surface de séparation des deux milieux en des points également équidistants AKKK, qui émettent des ondes sphériques, lesquelles se propagent avec la même vitesse que la lumière incidente ; l'enveloppe de ces ondes est un plan d'onde réfléchi.



- Les plans d'onde incidents équidistants AC et KL atteignent la surface de séparation des deux milieux en des points également équidistants AKKK, qui émettent des ondes sphériques, lesquelles se propagent dans le milieu dense avec une vitesse plus faible que dans le milieu ténu ; l'enveloppe de ces ondes est un plan d'onde réfracté.

La réfraction selon Newton et Huygens

- Pour Newton, la vitesse des particules doit augmenter quand on pénètre dans un milieu plus dense
- Pour Huygens, au contraire, la vitesse des ondes est plus faible dans le milieu plus dense

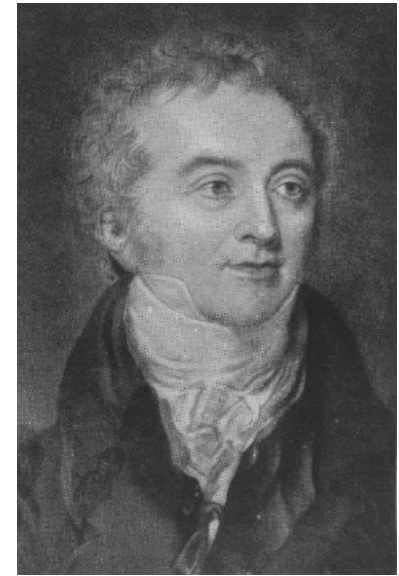
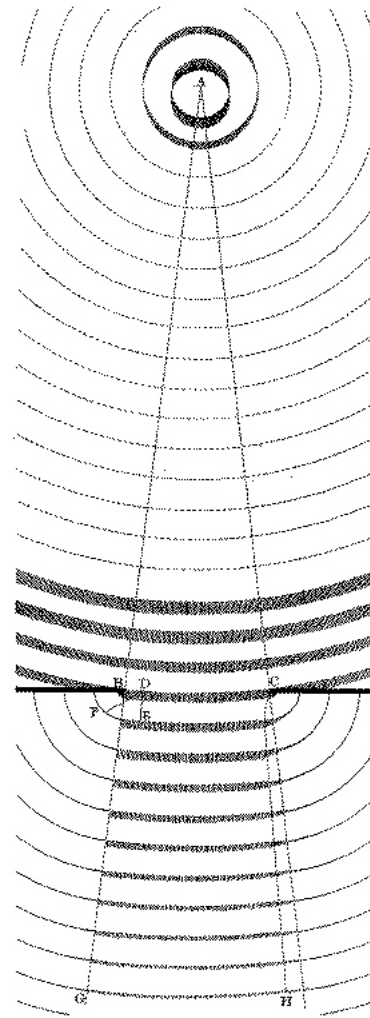


Controverses

- La réputation de Newton étant très grande, la plupart des savants étaient en faveur de la théorie corpusculaire, qui présentait l'avantage de ne pas recourir à l'éther mais n'expliquait pas bien toutes sortes de phénomènes. Cependant certains favorisaient la théorie ondulatoire, notamment Leonard Euler (1707-1783), qui écrivait en 1761: *Newton a été sans contredit un des plus grands génies qui aient jamais existé, et sa profonde science et sa pénétration dans les mystères les plus cachés de la nature demeurera toujours le plus éclatant sujet de notre admiration et de celle de notre postérité ; mais les égarements de ce grand homme doivent servir à nous humilier et à reconnaître la faiblesse de l'esprit humain, qui s'étant élevé au plus haut degré dont les hommes soient capables, risque néanmoins souvent de se précipiter dans les erreurs les plus grossières.*
- Ceci n'empêcha pas qu'il y eut des partisans de la théorie corpusculaire jusqu'en 1850.

Thomas Young (1773-1829)

- Young est le premier à rendre compte vers 1802 des interférences et de la diffraction par la théorie ondulatoire. Il explique aussi les couleurs des lames minces et les réseaux de diffraction. Malheureusement il fut très contesté et ses écrits sont assez confus, si bien qu'il n'a pas eu l'audience qu'il méritait.



Les premiers travaux de François Arago (1786-1853)

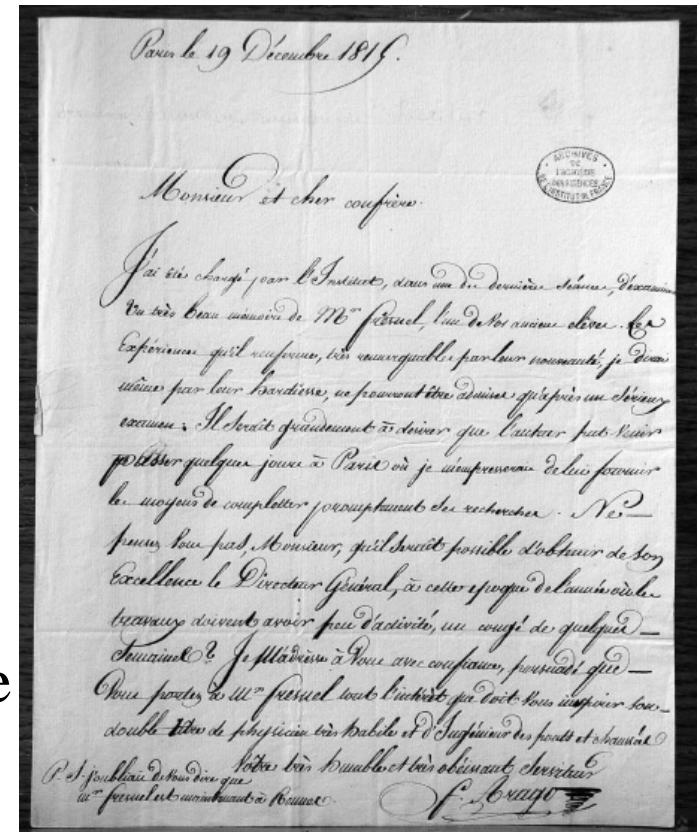


- En 1805, âgé de 19 ans, Arago entre à l'Observatoire de Paris où il fera toute sa carrière. En 1806 puis 1810, il travaille sur la vitesse de la lumière. Peu après la découverte de la polarisation de la lumière en 1808 par Étienne-Louis Malus (1775-1812), il découvre la polarisation rotatoire chromatique en 1811, et effectue des observations de la polarisation de la Lune et du Soleil.

Arago « découvre » Fresnel (1788-1827)

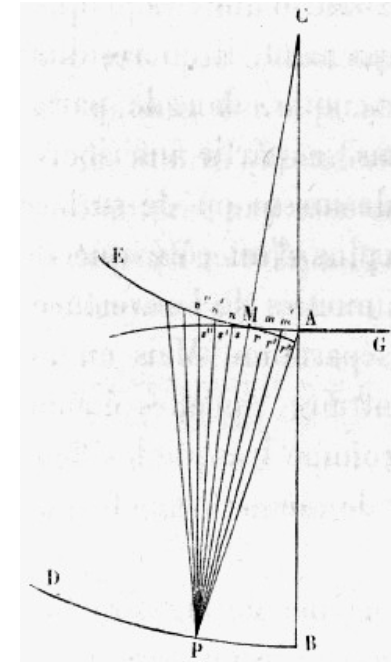
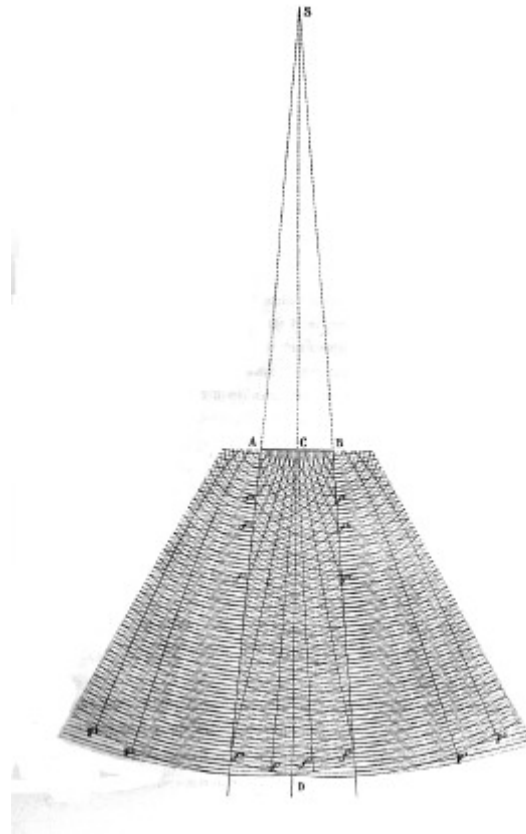


- En 1815, Augustin Fresnel, ingénieur des ponts et chaussées, qui s'était opposé à Napoléon lors des 100 jours, fut consigné dans son village de Mathieu. Il y tout loisir de travailler à la théorie de la lumière. Le 23 septembre il écrivait à Arago : *Je crois avoir trouvé l'explication et la loi des franges colorées qu'on remarque dans les ombres des corps éclairés par un point lumineux. Les résultats que me donne le calcul sont confirmés par l'observation.*
- Très intéressé, Arago écrit à Prony, le supérieur de Fresnel, pour lui demander de le laisser venir travailler avec lui à Paris. Autorisation accordée!



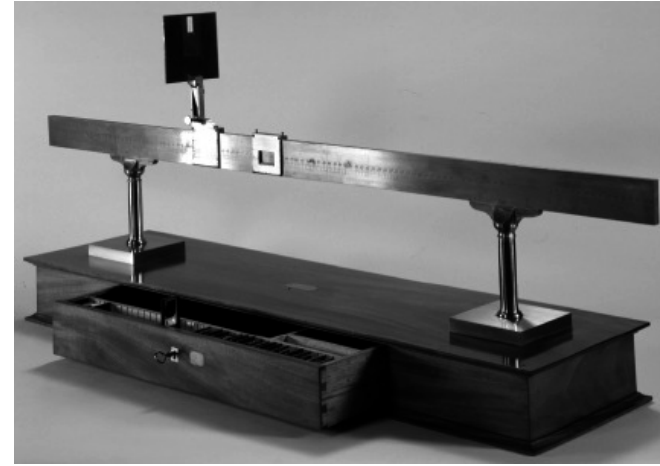
Diffraction et interférences

- Fresnel fut le premier à élaborer une théorie complète de la diffraction et des interférences. Il faisait la théorie et Arago l'aidait dans ses expériences.



Onde longitudinale ou transversale?

- Arago installa un laboratoire pour Fresnel à l'Observatoire. Il eut l'idée de faire interférer les deux composantes polarisées d'une même lumière. Les expériences qu'il a menées avec Fresnel ne montrèrent pas de franges. Fresnel en déduisit en 1821, non sans difficultés, que la lumière était une vibration transversale.



Une idée difficile à accepter

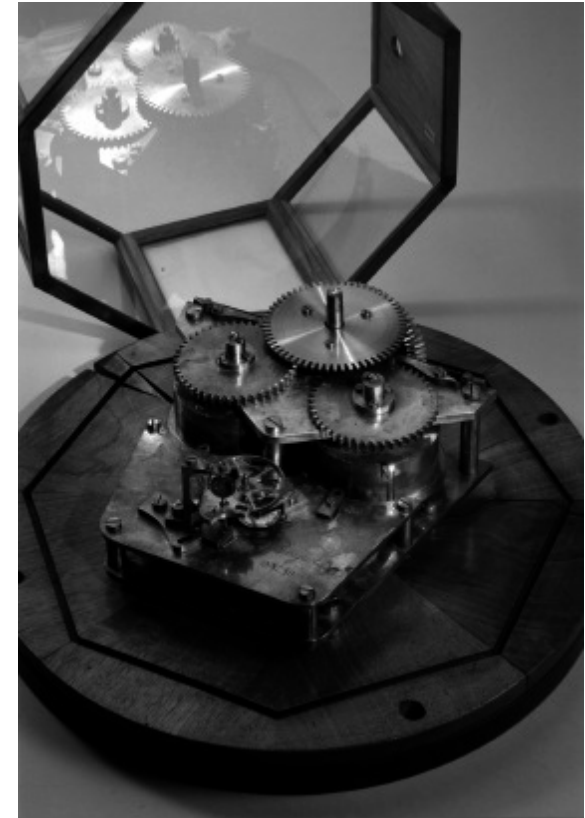
- Les contemporains avaient déjà bien du mal à admettre la théorie ondulatoire. Il leur fut encore plus difficile d'accepter l'idée d'une vibration transversale. Même Arago n'a jamais sauté le pas... *[Arago] a souvent raconté dans la suite ... qu'après que Fresnel et lui eurent prouvé par leurs expériences communes la non-interférence des rayons polarisés à angle droit, alors que Fresnel eut reconnu que les vibrations transversales étaient le seul moyen de concilier ce fait avec la théorie ondulatoire, Arago affirma qu'il n'aurait jamais le courage de publier une pareille conception, et d'un commun accord le nom de Fresnel parut seul en tête de la seconde partie du mémoire... M. Arago aurait peut-être adopté tout de suite la conception des vibrations transversales, lorsqu'elle fut proposée par son collaborateur, s'il n'avait pas été membre de l'Institut, et n'avait pas eu à supporter le choc de l'ennemi dans les discussions fréquentes qui avaient pour objet la doctrine des ondulations, Laplace et d'autres membres influents se montrant si opposés à cette théorie qu'ils ne voulaient pas même " écouter avec quelque patience les arguments qu'on présentait en sa faveur ". (W. Whewell, 1847, *History of inductive science.*)*

Les calculs « mécanistes » de Fresnel

- Malgré sa mort prématurée en 1827 et son important travail sur les phares, Fresnel eut le temps de construire une théorie quantitative complète et exacte de la lumière. Elle inclut par exemple les formules donnant l'intensité et la polarisation de la lumière transmise et réfléchie par l'interface entre deux corps transparents. Pour les établir, il supposait que l'onde initiale agitait les particules des corps qui réémettaient une autre onde, et appliquait la conservation de la quantité de mouvement. Ceci fut enseigné jusqu'à la fin du 19^e siècle.

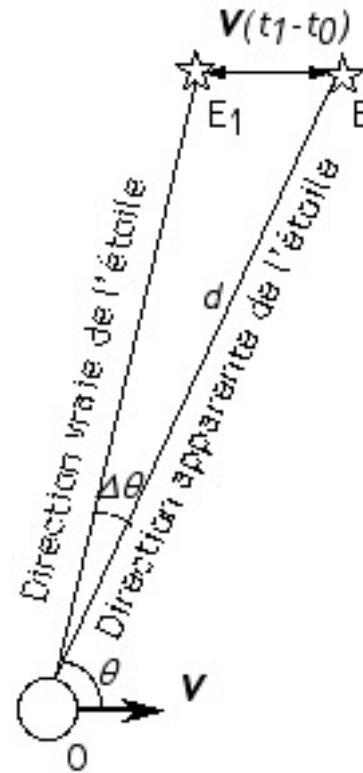
L'« expérience cruciale »

- Afin de choisir définitivement entre la théorie corpusculaire et la théorie ondulatoire, Arago imagina en 1838 un dispositif utilisant un miroir tournant pour comparer la vitesse de la lumière dans l'air et dans l'eau. L'expérience devait être réussie en 1850, d'abord par Léon Foucault (1819-1868), puis par Hippolyte Fizeau, avec un résultat concluant: la lumière allait moins vite dans l'eau que dans l'air : la théorie corpusculaire avait vécu.



La vitesse de la lumière est-elle invariable?

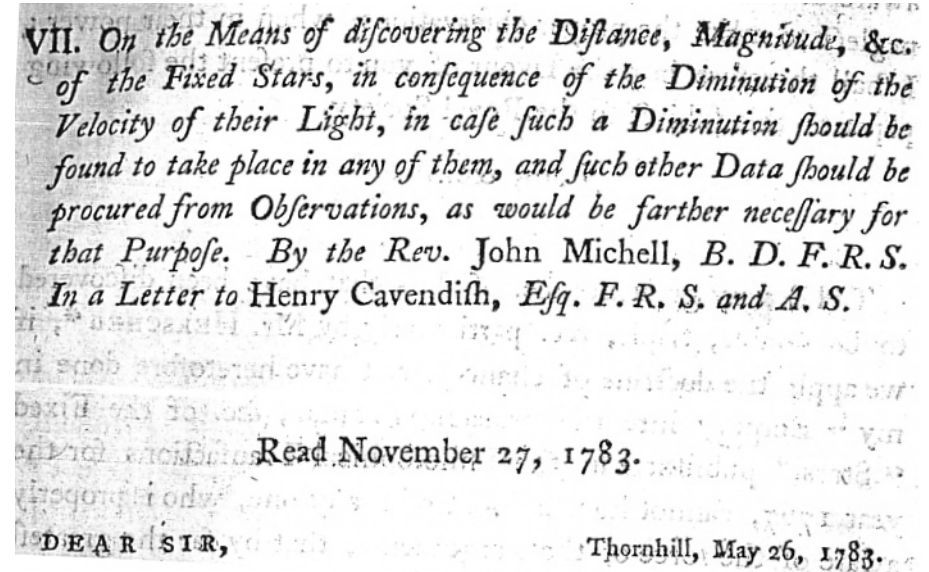
- En 1727, James Bradley découvrait l'aberration de la lumière des étoiles, et remarquait que la vitesse de la lumière ne pouvait différer de plus de 5 à 10% d'une étoile à l'autre.



L'angle entre les deux directions est $\Delta\theta = (V/c) \sin\theta$, et ne dépend pas de la distance de l'étoile. Six mois plus tard, la situation est inversée.

John Michell (ca. 1724-1783)

- En 1783, Michell, dans le cadre de la théorie corpusculaire, pense que la vitesse de la lumière émise par les étoiles peut dépendre de leur champ de gravitation, et qu'elle pourrait même n'en pas sortir si la masse de l'étoile est très grande. En mesurant la vitesse de la lumière, on pourrait donc obtenir la masse de l'étoile.



VII. *On the Means of discovering the Distance, Magnitude, &c. of the Fixed Stars, in consequence of the Diminution of the Velocity of their Light, in case such a Diminution should be found to take place in any of them, and such other Data should be procured from Observations, as would be farther necessary for that Purpose. By the Rev. John Michell, B. D. F. R. S. In a Letter to Henry Cavendish, Esq. F. R. S. and A. S.*

Read November 27, 1783.

DEAR SIR, Thornhill, May 26, 1783.

Sur la manière de découvrir la distance, la magnitude, etc. des étoiles fixes, comme conséquence de la diminution de la vitesse de leur lumière, au cas où cette diminution aurait lieu dans certaines d'entre elles, et que d'autres données seraient acquises par les observations, comme cela serait nécessaire dans ce but.

Comment mesurer la vitesse de la lumière provenant des étoiles?

- Dans le cadre de la théorie corpusculaire, on admet que lorsque la lumière entre dans un corps transparent dense, par exemple du verre, les particules « attirées » subissent une augmentation d'énergie indépendante de leur vitesse initiale.

$$(1/2)mv_{\text{verre}}^2 = (1/2)mv_{\text{initiale}}^2 + \text{constante}$$

Cette relation n'étant pas linéaire, la réfraction du rayon dépend de la vitesse de la lumière à l'entrée. Donc si on la fait passer dans un prisme, la déviation du prisme dépend de la vitesse de la lumière. C'est ce que Michell suggère de mesurer.

Les expériences d'Arago

- En 1806, Arago fait l'observation suggérée par Michell en mesurant la déviation de la lumière de sources terrestres, du Soleil, de planètes et d'étoiles avec des prismes de petit angle placés devant la lunette d'un cercle répétiteur. Aucun effet.



- En 1809-1810, Arago recommence avec un prisme achromatique donnant une déviation de 10° , monté devant un cercle méridien ou un cercle répéteur : aucun effet. Or il aurait pu cette fois détecter également l'effet du mouvement de la Terre...

85

Déviation avec la Déclinaison moyenne

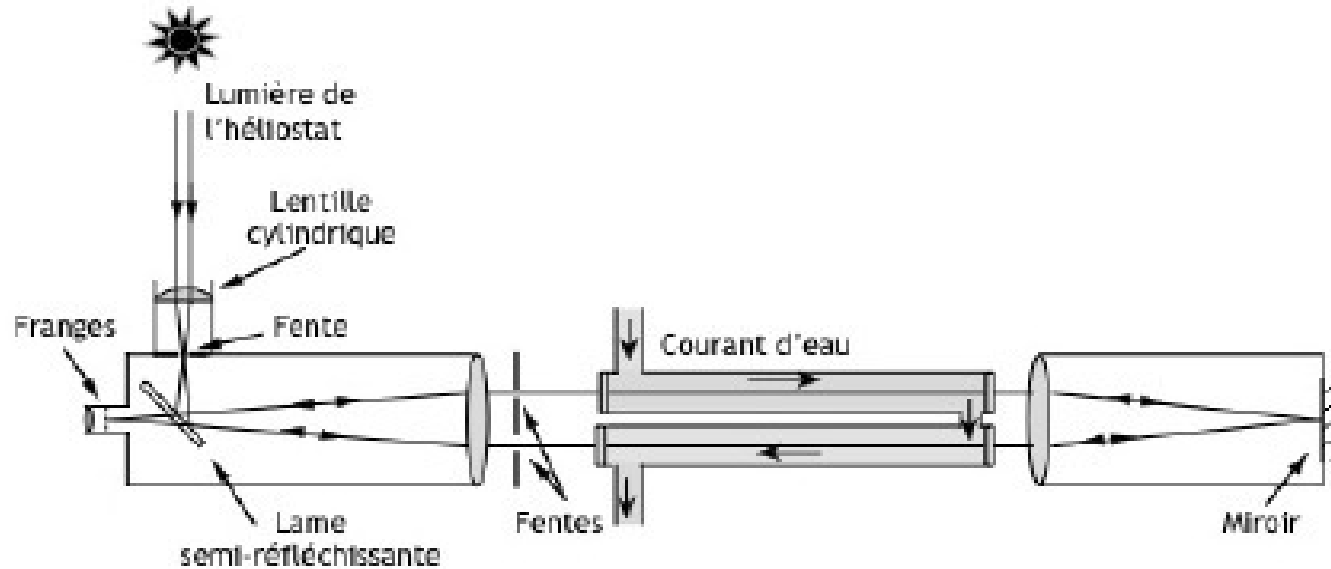
Étoile	1 ^{re} déviation	2 ^{me} déviation	Moyenne
Rigel	$10^\circ 4' 18'' 86$	$10^\circ 4' 26'' 16$	$10^\circ 4' 21'' 5$
α Orion	$10^\circ 4' 22'' 0$	$10^\circ 4' 25'' 5$	$10^\circ 4' 23'' 75$
Sirius			
Castor	$10^\circ 4' 23'' 6$	$10^\circ 4' 24'' 6$	$10^\circ 4' 24'' 1$
Procyon	$10^\circ 4' 19'' 6$	$10^\circ 4' 24'' 9$	$10^\circ 4' 22'' 3$
β Luluc	$10^\circ 4' 25'' 4$	$10^\circ 4' 29'' 3$	$10^\circ 4' 27'' 2$
α hydre	$10^\circ 4' 19'' 2$	$10^\circ 4' 22'' 6$	$10^\circ 4' 20'' 9$
Regulus	$10^\circ 4' 21'' 5$	$10^\circ 4' 25'' 2$	$10^\circ 4' 23'' 3$
β du lion	$10^\circ 4' 16'' 6$	$10^\circ 4' 20'' 2$	$10^\circ 4' 18'' 1$
Épi de la queue	$10^\circ 4' 15'' 7$	$10^\circ 4' 21'' 4$	$10^\circ 4' 18'' 5$
Arcturus	$10^\circ 4' 15'' 3$	$10^\circ 4' 16'' 0$	$10^\circ 4' 15'' 7$
α Couronne	$10^\circ 4' 20'' 9$	$10^\circ 4' 22'' 8$	$10^\circ 4' 21'' 9$
α du serpent	$10^\circ 4' 18'' 1$	$10^\circ 4' 22'' 3$	$10^\circ 4' 20'' 2$
Antares	$10^\circ 4' 17'' 5$	$10^\circ 4' 22'' 5$	
β de l'opinion	$10^\circ 4' 19'' 0$	$10^\circ 4' 24'' 00$	

OBSERVATOIRE DE PARIS

L'explication de Fresnel

- Arago et Laplace sont perplexes devant ce résultat négatif. Arago écrit: *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.*
- Arago est cependant peu convaincu. Il lui semble qu'il faut abandonner la théorie corpusculaire, et demande à Fresnel d'interpréter le résultat dans le cadre de la théorie ondulatoire. Fresnel s'exécute en 1818. D'une part il conclut correctement que les étoiles doivent toutes émettre la lumière sensiblement avec la même vitesse, et il explique le fait que l'effet du mouvement orbital de la Terre ne soit pas détecté par un *entraînement partiel* de l'éther par la Terre (et donc le prisme). Bien entendu, il suppose pour ce faire que la vitesse de la Terre s'ajoute ou se retranche linéairement de la vitesse de la lumière.

L'expérience de Fizeau (1851)



- Sans doute à l'instigation d'Arago, Hippolyte Fizeau réalise une expérience destinée à observer l'entraînement de la lumière par un courant d'eau. Cette expérience délicate réussit, et le résultat conforte l'idée de Fresnel sur l'entraînement partiel de l'éther par un corps en mouvement.



Les explications modernes

- Les observations d'Arago et l'expérience de Fizeau (refaite par Michelson avec des résultats concordants) ne peuvent s'interpréter que dans le cadre de la relativité restreinte.
- Tout d'abord, il est clair qu'Arago ne pouvait rien observer avec ses prismes, où la lumière pénètre toujours avec la vitesse c (ou un peu moins puisque l'on est dans l'air).
- Dans l'expérience de Fizeau, la vitesse de la lumière qui est $v = c/n$ dans l'eau ($n = 1,33$) se compose avec la vitesse u de l'eau selon la formule relativiste :

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

qui s'écrit au premier ordre en u/c :

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

C'est justement la formule écrite par Fresnel et par Fizeau! Si la vitesse de la lumière s'était simplement composée avec celle de l'eau on aurait eu :

$$V = v + u,$$

ce qui est très différent.

Conclusions

- Fresnel, aidé par Arago, a fait triompher la théorie ondulatoire de la lumière, l'a rendue quantitative et en a tiré toutes les conséquences possibles à l'époque.
- Mais restait le problème de l'éther, un milieu *ad-hoc* sans lequel on ne pouvait concevoir la propagation de la lumière. Même Maxwell croyait encore à l'éther, qui n'a été abandonné que par Einstein.
- Michell, Arago, Fresnel, Fizeau, Michelson, Mascart et bien d'autres se sont intéressés à la vitesse de la lumière. L'interprétation des phénomènes observés a toujours supposé l'existence de l'éther, même celle de l'expérience de Michelson-Morley qui était censée montrer qu'il était impossible de mesurer le mouvement de la Terre *par rapport à l'éther*. Seule la relativité restreinte a pu donner une explication cohérente des phénomènes observés.
- On a souvent dit que Laplace (plagiant Michell ?) avait prédit l'existence des trous noirs. Mais c'est oublier que pour eux c'était la *vitesse* de la lumière, et non sa *longueur d'onde*, qui devait être affectée par le champ de gravitation de l'objet.