

Augustin FRESNEL et la théorie ondulatoire de la lumière

Augustin Jean Fresnel, est né le 10 mai 1788 et mort de la tuberculose à 39 ans, le 14 juillet 1827. Il est ingénieur des Ponts et Chaussées. Il est plus connu aujourd'hui comme concepteur des appareils lenticulaires pour feu à éclats des phares maritimes installés pour la première fois au phare de Cordouan, récemment inscrit au patrimoine mondial. Ce serait oublier que ses recherches ont conduit à l'acceptation définitive de la *théorie ondulatoire* de la lumière en remplacement de la *théorie d'émission corpusculaire* qui s'était imposée depuis Newton.



En s'appuyant sur les concepts émis par Christian Huygens à la fin du XVII^e siècle, et en procédant à ses propres expériences sur la diffraction, il retrouva indépendamment les observations faites quelques années plus tôt par Thomas Young sur les interférences et leur donna les fondements physiques et mathématiques qui emportèrent l'adhésion des physiciens de son époque.

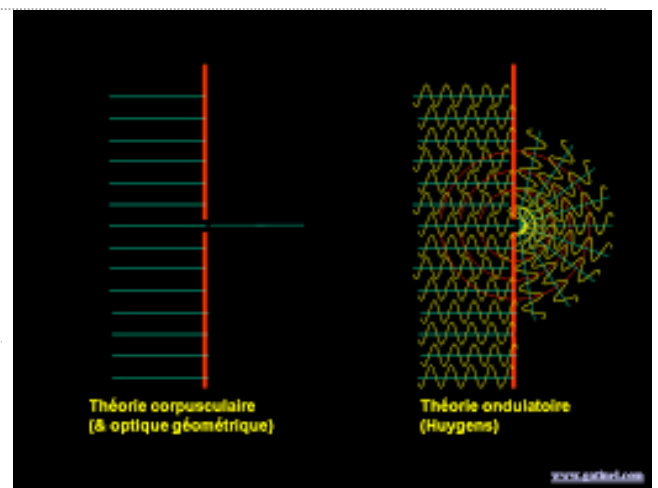
Les œuvres complètes d'Augustin Fresnel ont été publiées en trois tomes de plus de 800 pages chacun, par Henri de Sénarmont, Émile Verdet et Léonor Fresnel, en 1868 à l'Imprimerie impériale, Paris.

Vu l'abondance et la diversité de ces œuvres, nous nous limiterons essentiellement à son étude de la diffraction de la lumière en vue d'établir la théorie des ondes lumineuses.

Premier mémoire sur la diffraction de la lumière (1815)

La diffraction est un phénomène de déviation des phénomènes d'ondes : ondes sonores, ondes radio électromagnétiques, ondes lumineuses. Ainsi lorsque des rayons lumineux frappent un corps opaque, celui-ci se met à rayonner au contact de ces rayons en devenant lui-même une source lumineuse. Le phénomène est particulièrement visible si les rayons lumineux frappent une arête ou une fente de petite dimension percée dans un écran.

Figure 1 : Diffraction et interprétations



Théorie corpusculaire de Newton versus théorie ondulatoire de Huygens

Newton pose comme principe que la lumière est émise sous forme de corpuscules. Fresnel s'attache d'abord à montrer que dans la diffraction, certains phénomènes comme les franges colorées que présentent les ombres des corps éclairés par un point lumineux, sont totalement inexpliquées par les tenants de l'approche corpusculaire qui s'imposait depuis Newton (1666).

Dispositif expérimental

Fresnel ne dispose chez sa mère en province d'aucun instrument et doit construire le dispositif expérimental avec les moyens du bord :

- La source lumineuse : il utilise comme Newton la lumière du soleil qu'il laisse filtrer à travers l'ouverture dans un volet ; « ...N'ayant pas de plus forte lentille, je me suis servi d'un globule de miel déposé sur un petit trou fait à une feuille de cuivre »
- L'obstacle : « Éclairé par ce globule, le fil de fer dont je mesurais les franges en produisait encore très nettes même à un centimètre du point lumineux ».
- Pour mesurer les franges sur l'écran, il construit un micromètre formé de deux fils de soie, « un petit carton mobile me sert de marquer l'endroit où la distance entre les fils est égale à la largeur de l'ombre »

L'usage de la lumière blanche pour ses premières expériences fait que les franges des différentes longueurs d'onde constituant la lumière blanche se chevauchent. Il fait ses mesures entre les franges rouges du premier ordre et les franges violettes du second ordre et prend pour ses calculs une longueur d'onde moyenne.

Approche théorique

Fresnel a exploité les concepts exposés en 1690 par Christian Huygens dans son *Traité de Lumière* :

« Chaque particule de la matière dans laquelle une onde s'étend, ne doit pas communiquer son mouvement seulement à la particule prochaine, qui est dans la ligne droite tirée du point lumineux, mais qu'elle en donne nécessairement à toutes les autres qui la touchent et qui s'opposent à son mouvement. De sorte qu'il faut, qu'autour de chaque particule, il se fasse une onde dont cette particule soit le centre. »

Fresnel a complété ce concept avec le principe des interférences pour expliquer les phénomènes de propagation, diffraction et d'interférences lumineuses.

Le terme même de *Principe d'Huygens-Fresnel* a été introduit vers 1870 par Gustav Kirchoff et Robert Bunsen.

Fresnel mesure d'une part les franges extérieures à l'ombre portée (en EG sur la figure) et d'autre part les franges intérieures qui se forment à l'intérieur de l'ombre (FDE sur la figure).

Franges extérieures

Pour les franges extérieures, Fresnel note en particulier que

« Une conséquence très remarquable de cette théorie de la diffraction, c'est que la même frange ne se propage pas en ligne droite, mais suivant une hyperbole, dont les foyers sont le point lumineux et un des bords du fil [...] La différence entre les deux rayons vecteurs étant presque égale à la distance entre les deux foyers, l'hyperbole se rapproche extrêmement d'une ligne droite et c'est ce qui a été cause de l'erreur où est tombée Newton. »

$AB = c$ diamètre du fil

$AQ = b$, distance du rayon diffracté à l'écran d'observation

$$BQ = AQ + \frac{\lambda}{2} = b + \lambda/2$$

Équations des cercles centrés en A $(0, c/2)$ et B $(0, -c/2)$

$$\left(y + \frac{c}{2}\right)^2 + x^2 = b^2$$

$$\left(y - \frac{c}{2}\right)^2 + x^2 = \left(b + \frac{\lambda}{2}\right)^2$$

Le point Q à l'intersection de ces 2 cercles

$$y = DQ = \frac{b\lambda}{2c}$$

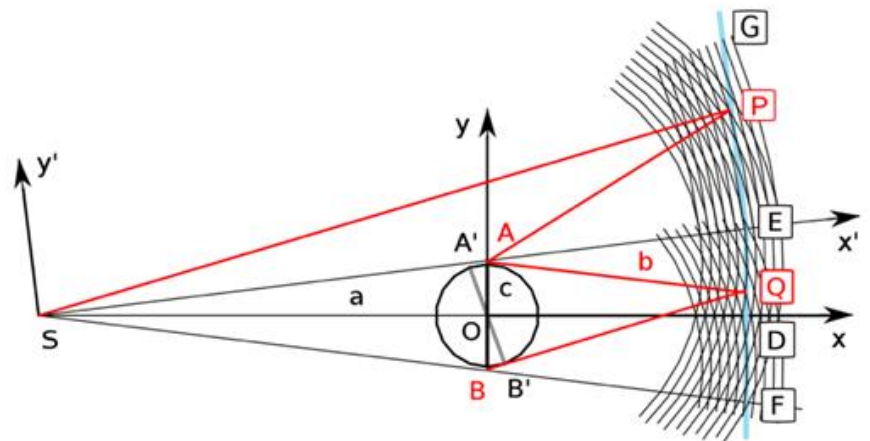


Figure 2 : Diffraction de la lumière par les bords d'un fil

Franges intérieures (cf. figure)

Pour trouver la relation qui donne la distance entre les franges intérieures, Fresnel observe que les rayons sont diffusés aux points A et B du fil où les rayons de la source S tangentent le fil. Ces points sont à leur tour source d'ondelettes sphériques. Le premier point d'extinction Q sur l'écran correspond à la superposition de deux rayons AQ et BQ en opposition de phase c'est-à-dire correspondant à une différence de trajet d'une demie longueur d'onde $\frac{\lambda}{2}$.

Fresnel fait alors une construction géométrique en traçant les cercles centrés au bord de l'obstacle et de rayons successifs augmentés d'une demie longueur d'onde.

x et y sont les coordonnées du point d'extinction Q, situé à l'intersection de ces deux cercles (voir figure) :

$$y = DQ = \frac{b\lambda}{2c}$$

Étant donné que , la distance d'une frange à l'axe des abscisses, Fresnel en déduit que la distance entre les deux franges sombres du premier ordre est deux fois plus grande, soit . L'écart entre celles du deuxième ordre est , entre celles du troisième ordre, . Dans un tableau comparatif, il montre que les mesures effectuées corroborent le résultat des calculs⁴⁷

Fresnel a donc traité les bords de l'obstacle A et B comme deux sources ponctuelles cohérentes.

Il a reproduit avec cet autre dispositif, l'expérience des doubles fentes que Young avait conduite 15 ans plus tôt et a retrouvé les mêmes résultats. Il a cependant prouvé que, avec la théorie ondulatoire, il pouvait expliquer le phénomène de la diffraction.

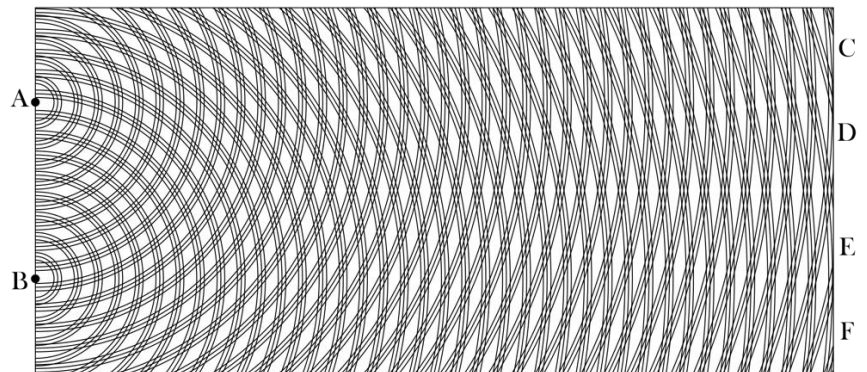


Figure 3 : Réplique du diagramme d'interférence des deux sources de Young (1807), avec les sources A and B produisant des minima à C, D, E, et F²

L'ensemble des résultats obtenus fait l'objet d'un premier mémoire que Fresnel dépose à l'académie des Sciences le 23 octobre 1815. Le 8 novembre, Arago de deux ans son aîné lui répond :

« J'ai été chargé par l'Institut de l'examen de votre mémoire sur la diffraction de la lumière. Je l'ai étudié avec soin et j'y ai trouvé un grand nombre d'expériences intéressantes, dont quelques-unes avaient déjà été faites par le docteur Thomas Young qui, en général, envisage ce phénomène de manière analogue à celle que vous avez adoptée. Mais ce que, ni lui, ni personne n'avait vu avant vous, c'est que les bandes colorées extérieures ne cheminent pas en ligne droite à mesure qu'on s'éloigne du corps opaque. Vous pouvez compter sur l'empressement que je mettrai à faire valoir votre expérience : la conséquence qui s'en déduit est tellement opposée au système à la mode, que je dois m'attendre à beaucoup d'objections ».

Nouvelles expériences à Paris avec Arago et Version finale du premier Mémoire sur la diffraction

En février 1816, Fresnel revient à Paris et réalise de nouvelles beaucoup d'expériences et de mesures qui ont été refaites avec Arago en utilisant de la lumière monochromatique rouge (nm).

Une version corrigée et enrichie est présentée à l'Académie par Arago, le 25 mars 1816 intitulée *Mémoire sur la diffraction de la lumière, où l'on examine particulièrement le phénomène des franges colorées que présentent les ombres des corps éclairés par un point lumineux*

En mars, Fresnel a déjà des compétiteurs : Biot présente un mémoire sur la diffraction dont il est l'auteur avec son étudiant Claude Pouillet. Mais la présentation n'est pas rigoureuse et Pouillet lui-même deviendra un des premiers défenseurs de la théorie ondulatoire. Le 24 mai 1816, Fresnel écrit (en français) à Young, reconnaissant qu'une grande partie de son mémoire n'est pas originale.

Supplément au premier Mémoire sur la diffraction

Trois semaines après avoir envoyé son premier Mémoire, Fresnel envoie à l'Académie un *Supplément au premier Mémoire sur la diffraction de la lumière*. Ce mémoire est présenté à l'académie le 15 juillet 1816 par Arago.

Fresnel commence par présenter, en les réfutant, les hypothèses de Newton sur les anneaux colorés. Il présente ensuite sa propre interprétation du phénomène.

Il rapporte ensuite deux expériences nouvelles et une nouvelle approche théorique : la diffraction par une fente lumineuse, les interférences obtenues par les images d'une fente lumineuse par deux miroirs et la diffraction par un petit objet opaque.

Figure de diffraction d'une fente lumineuse

Fresnel refait l'expérience, rapportée par Biot, de la diffraction de la lumière par une fente étroite. Il ne trouve pas la même chose et découvre la loi de répartition des franges. Il appelle b la distance de la fente (ou diaphragme) à l'écran d'observation, c , la largeur de la fente et λ , la longueur d'onde.

« La distance entre les points les plus sombres de deux bandes consécutives, prises à droite ou à gauche de l'intervalle clair du milieu, était égale à $b\lambda/c$, ou du moins en différait assez peu. Quant à l'intervalle du milieu, j'ai trouvé qu'il variait entre deux limites $b\lambda/c$ et $2b\lambda/c$, suivant une loi que je n'ai pas encore pu déterminer.

Lorsque le diaphragme est très étroit, et qu'on en reçoit l'ombre à une distance assez considérable, l'intervalle du milieu est toujours, à très peu près, le double des autres intervalles ».

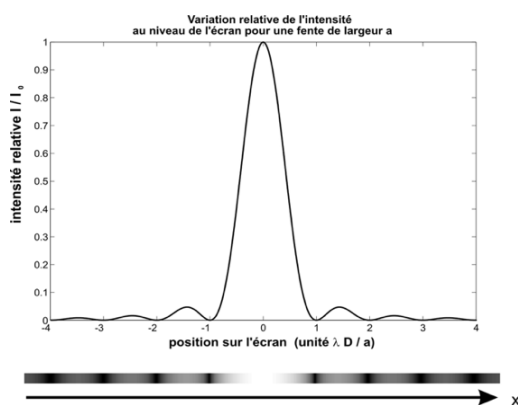


Figure 4 : Figure de diffraction d'une fente lumineuse

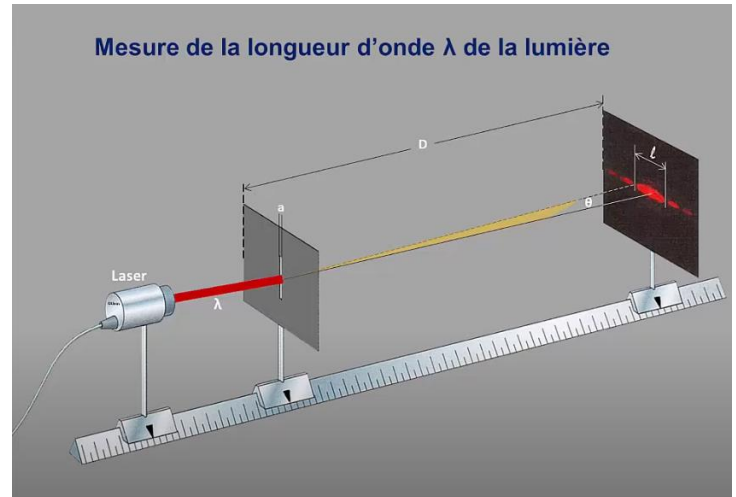
L'enseignement aujourd'hui de la diffraction par une fente lumineuse

L'étude de la diffraction de la lumière fait partie du programme de Terminal S. Elle reprend avec des moyens modernes, l'expérience de la figure de diffraction par une fente effectuée par Fresnel et Arago.

Pour des raisons historiques on distingue encore dans les manuels et vidéos scolaires, la diffraction et les interférences, alors que ces deux phénomènes dérivent de l'aspect ondulatoire de la lumière et ne vont pas l'un sans l'autre : Il n'y a pas de diffraction sans interférences.

Le dispositif expérimental standard actuel fait appel à un rayon laser de longueur d'onde bien définie.

Figure 5 : banc de mesure de la diffraction



La répartition des tâches et de leur intensité

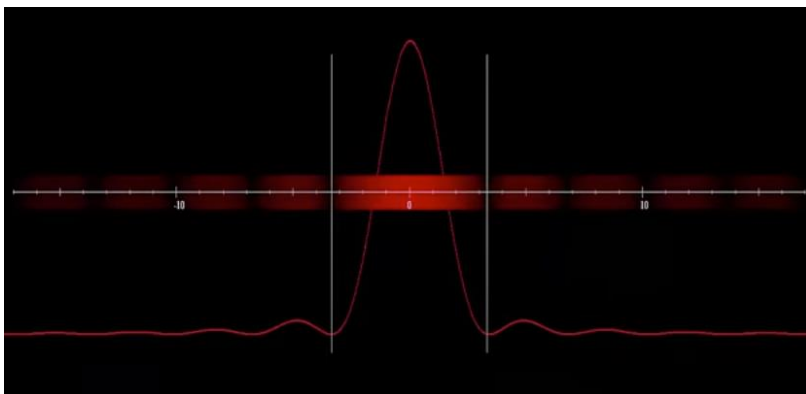


Figure 6 : taches de diffraction sur écran et intensité lumineuse

La largeur y de la tache centrale

figurant dans les manuels de Terminal S est $y = \frac{2\lambda D}{a}$

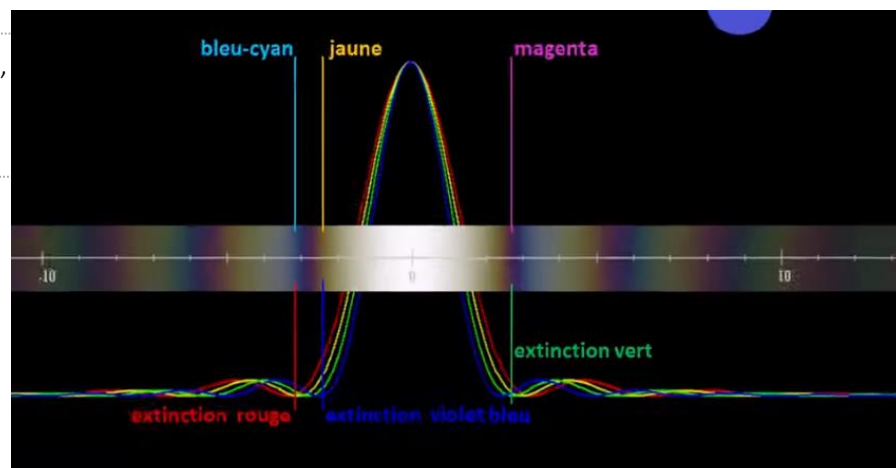
D étant la distance entre la fente et l'écran.

Cas de la lumière naturelle

La lumière blanche étant considérée comme la superposition des 3 couleurs fondamentales, jaune, bleu-cyan et magenta, s'il y a extinction :

- du rouge, c'est le bleu-cyan qui domine,
- du bleu c'est le jaune qui domine,
- du vert, c'est le magenta qui domine.

Figure 7 : diffraction de la lumière blanche



On conçoit qu'avec le premier dispositif adopté par Fresnel bricolé avec la lumière naturelle, celui-ci ait rencontré des difficultés. On ne peut qu'admirer qu'il ait obtenu cependant des résultats significatifs.

Avec le dispositif à fente et une lumière monochromatique, Fresnel, avec l'aide d'Arago, a pu améliorer ses résultats, et rappelons-nous que la lumière était celle d'une bougie !

Deuxième Mémoire sur la diffraction de la lumière

Le 17 mars 1817, l'Académie des sciences annonce que la *diffraction de la lumière* sera le thème du prochain Grand Prix biennuel de physique qui sera attribué en 1819. La date limite de soumission des manuscrits est fixée au 1^{er} août 1818, de façon que le jury ait le temps de répéter les expériences proposées. Arago et Ampère encourage Fresnel à participer au concours.

Le jury du concours est composé de Laplace, Biot et Poisson, tous trois tenant de la théorie corpusculaire newtonienne, Gay Lussac(neutre), et Arago qui, à la fin, écrit le rapport du jury.

Le mémoire de Fresnel *Natura simplex et fecunda* comportait deux parties :

1. Composition de deux fonctions sinusoïdales

Cette partie reprend une note additionnelle, additionnelle à un article sur la polarisation *parue* le 15 janvier 1818.

Soit deux systèmes d'onde de même longueur d'onde λ et de même fréquence ν :

$$u_1 = a_1 \sin 2\pi \left(\frac{x}{\lambda} - \nu t \right)$$

$$u_2 = \sin 2\pi \left(\frac{x + d}{\lambda} - \nu t \right)$$

L'onde résultante est de la forme :

$$A = u_1 + u_2 = \sin 2\pi \left(\frac{x + D}{\lambda} - \nu t \right)$$

Fresnel indique que :

« L'onde résultant du concours des deux autres, quelles que soient leurs positions relatives, répond exactement, pour son intensité et pour sa situation, à la résultante de deux forces égales aux intensités des deux faisceaux lumineux, et faisant entre elles un angle qui soit à la circonférence entière comme l'intervalle qui sépare les deux systèmes d'ondes est à la longueur d'une ondulation ».

Sa méthode sera désignée par la suite comme celle des *Vecteurs de Fresnel*, la notion de vecteur n'ayant pas été développée à l'époque Fresnel a eu recours à la composition de forces. (Figure 8 ci-dessous).

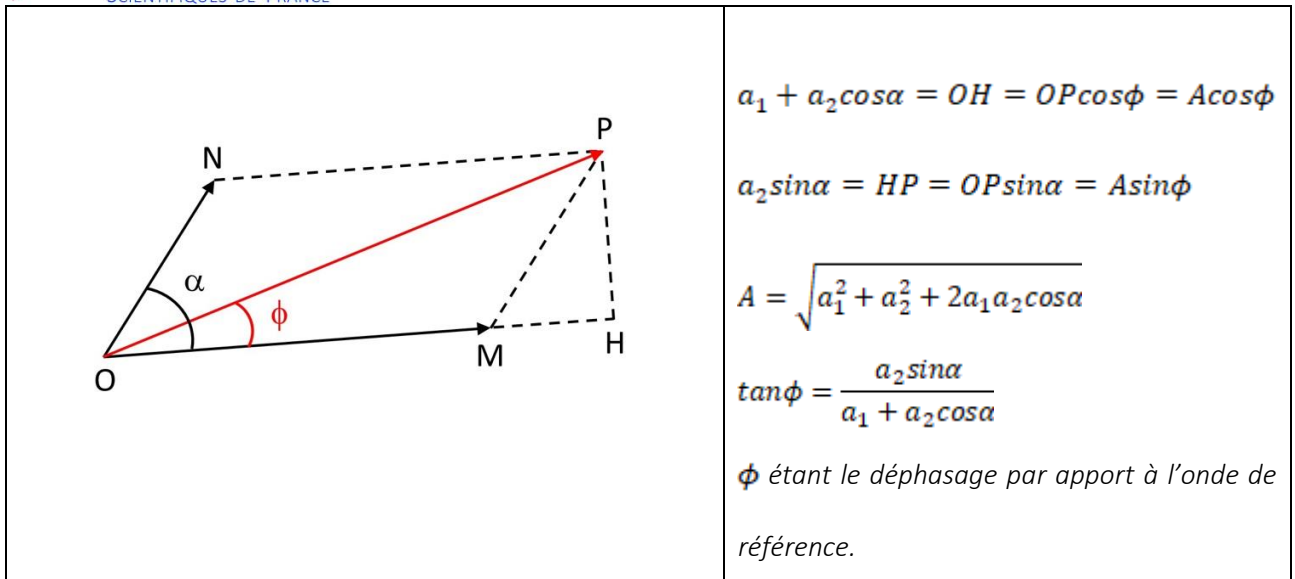


Figure 8 : Interférence de deux ondes sinusoïdales représentées par des vecteurs

2. Diffraction par un bord rectiligne

La méthode est exposée dans une note préliminaire du 19 avril 1818 et reformulée dans le mémoire soumis au jury. Pour la diffraction par un bord droit, l'intensité en fonction de la distance au bord de l'ombre géométrique peut alors être exprimée avec suffisamment d'exactitude par ce qu'on appelle maintenant les *intégrales de Fresnel normalisées* :

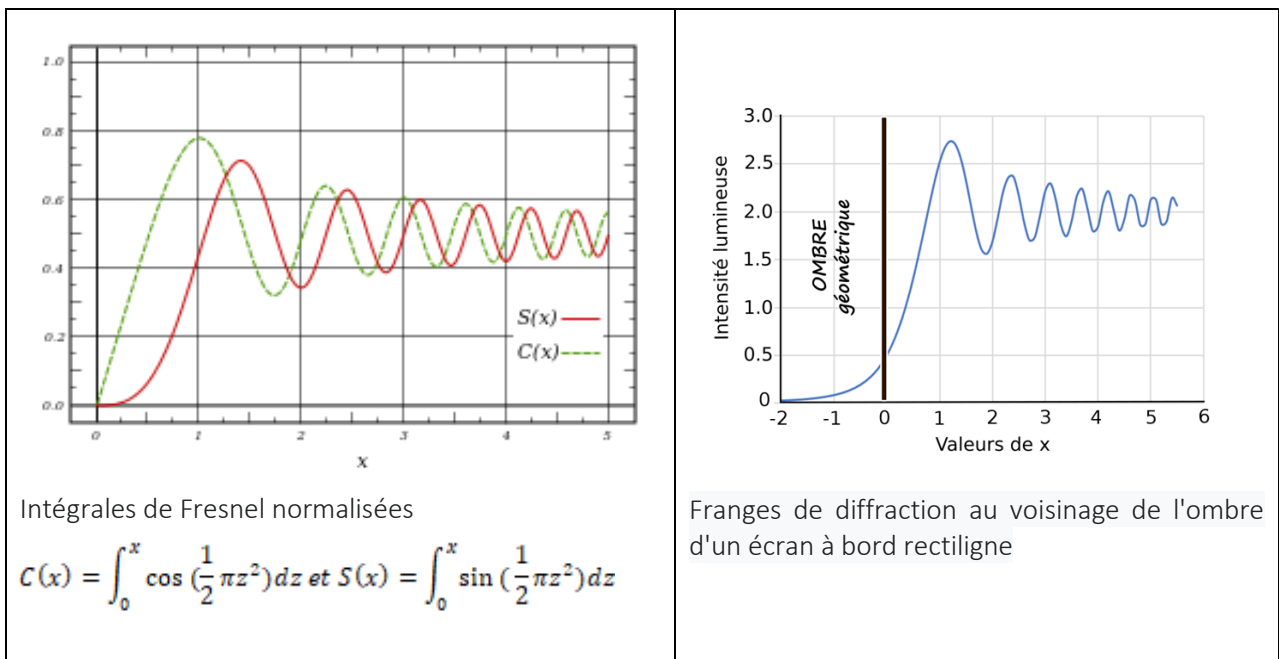


Figure 9 : Intégrales de Fresnel et application à un écran à bord rectiligne

L'examen du jury dura jusqu'à l'année suivante (1819). Au cours de cet examen, Poisson, exploitant un cas où la théorie de Fresnel donnait des intégrales faciles, trouva que la théorie prédisait l'existence d'un point lumineux au centre de l'ombre projetée d'un petit disque éclairé par une source ponctuelle. Ceci semblait être une preuve par l'absurde que la théorie de Fresnel était fausse.

Arago, intrigué par la démonstration de Poisson, réalisa l'expérience avec un disque opaque de 2 mm de diamètre et observa que, effectivement, une tache claire apparaissait au centre de l'ombre.

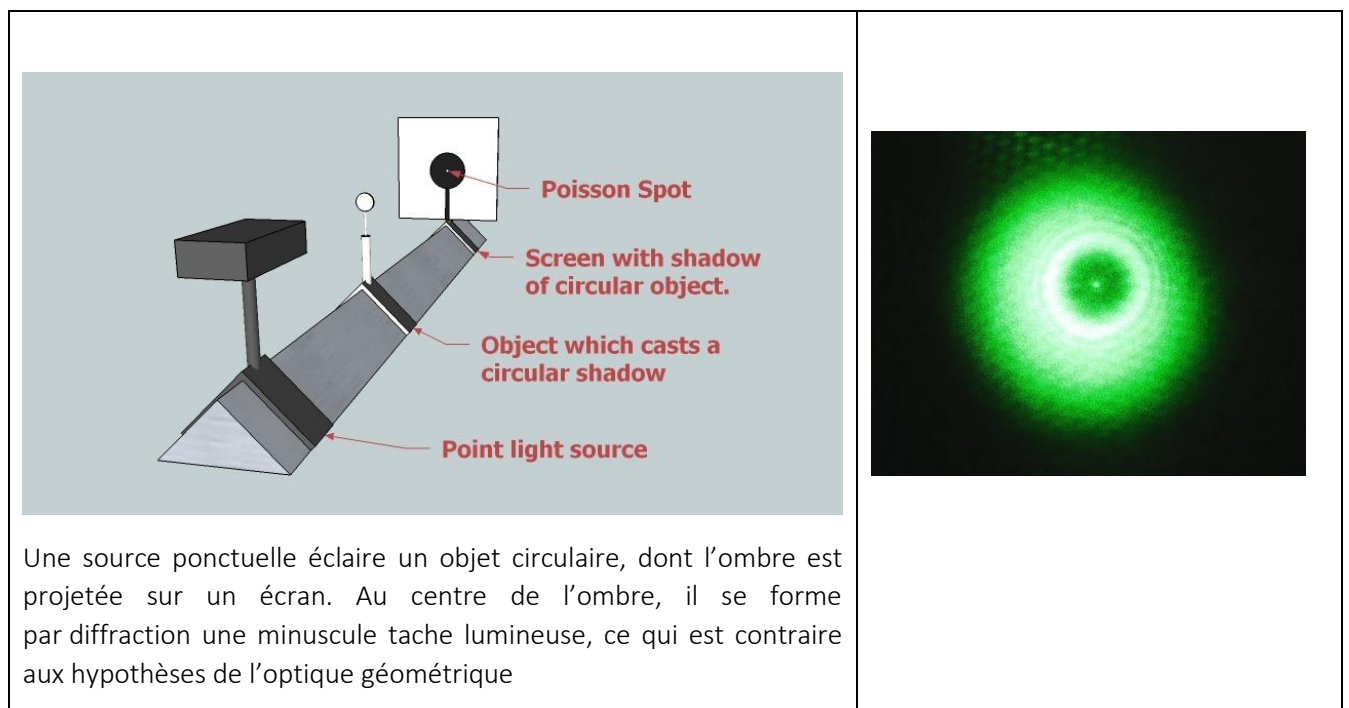


Figure 10 : Tâche de Poisson

Le jury unanime accorda le Grand Prix au mémoire portant la sentence *Natura simplex et fecunda* au cours de la séance de l'Académie du 15 mars 1819.

Polarisation et Ondes transversales

En 1669, le danois Rasmus Bartholin découvre qu'un cristal de spath d'Islande (calcite transparente) donne une double image d'un texte sur lequel il est posé. Les propriétés optiques étranges de ce minéral intriguent les savants. Christian Huygens les étudie avec soin et publie ses observations dans son *Traité de la lumière* en 1690. La capacité de la lumière à donner deux faisceaux dans certaines circonstances, est nommée « *polarisation* » par Newton.

En 1808, Étienne Louis Malus découvre la polarisation¹, et publie en 1809 un document sur sa théorie de la polarisation de la lumière.

Comme ses contemporains (Malus, Biot, Young, Arago, etc.) Fresnel a effectué des recherches sur la polarisation. Il n'a probablement pas été le premier à suspecter que les ondes lumineuses auraient une *composante* transversale, ou que les ondes *polarisées* étaient exclusivement transversales. C'est Young qui a été le premier à publier l'idée que la polarisation dépend de l'orientation d'une onde transversale.

Mais ses théories incomplètes n'avaient pas réconcilié la nature de la polarisation avec l'existence apparente d'une lumière non-polarisée. C'est à Fresnel qu'on doit l'achèvement de la théorie de la polarisation de la lumière, l'explication de la biréfringence et de la polarisation circulaire.

Selon Émile Vernet co-auteur de la publication des œuvres de Fresnel, « *La conception des vibrations transversales fut le point de départ de recherches qui constituent peut-être la plus importante partie de l'œuvre de Fresnel* ».

Épilogue : Le photon et la dualité onde-corpuscule

Alors que la théorie ondulatoire de la lumière semblait bien établie, en 1885, Hertz montre qu'un rayonnement ultraviolet projeté sur une plaque de zinc en arrache les électrons, ce que ne peut pas expliquer la théorie ondulatoire. De fait en 1905, Einstein va rendre compte de cet effet photoélectrique en établissant que le rayonnement est constitué de corpuscules, les photons, de masse nulle mais porteurs d'un quantum d'énergie.

A l'inverse, dans l'effet Compton découvert une quinzaine d'années plus tard, toute ou partie de l'énergie du photon est communiquée à l'électron et le photon est diffusé. En général l'énergie du photon est grande : rayons X ou gamma. *L'effet Compton tend à montrer que la lumière peut être décrite par un ensemble de corpuscules de masse nulle, les photons.*

Louis de Broglie propose en 1924 le cadre de la mécanique ondulatoire : la lumière a ainsi deux aspects l'une ondulatoire qui prévaut dans la propagation des rayonnements, l'autre corpusculaire qui se manifeste lors d'une interaction avec la matière en donnant lieu à la détection ou à l'émission de l'énergie et de la quantité de mouvement qui sont transférées via des photons.

Aujourd'hui la mécanique quantique rend compte plus généralement de ce double aspect corpusculaire et ondulatoire en attribuant aux particules que sont les photons, des nombres quantiques découlant des données spectrales (fréquence, longueur d'onde, pulsation, son nombre d'onde énergie).

De son vivant, Fresnel, de santé fragile, a eu conscience que son influence restait limitée, dans l'ombre apportée par Thomas Young qui lui fera du reste obtenir la médaille Rumford de la Royal Society à la fin de sa vie. Son œuvre aura connu cependant une diffusion importante à titre posthume et sera valorisée à la fin du 19^{ème} siècle. Deux cents ans après, l'approche ondulatoire de la lumière par Fresnel ne reste pas moins d'actualité, ne serait-ce que dans les applications de la diffraction et son enseignement : détermination des longueurs d'onde, cristallographie, optique réfringente, etc.

Fresnel figure parmi les 72 noms de savants et ingénieurs inscrits à la demande de Gustave Eiffel, au premier étage de la Tour Eiffel (photo ci-après).



Jean-François Coste

Membre du Comité Patrimoine d'IESF

Bibliographie

- Vidal Cohen, Contraintes et opportunités d'un parcours d'exception : le cas Fresnel, L'art de l'ingénieur de Perronet à Caquot, Numéro hors-série des Annales des Ponts et Chaussées, bicentenaire du Conseil général des ponts et chaussées, Presses de l'école nationale des Ponts et chaussées, 2004 ;
- Augustin Fresnel, Wikipédia :
- Principe de Huyghens-Fresnel, Wikipedia
- Cours de Physique Terminal S, Ondes.1.5.2 : Diffraction 2^{ème} leçon, YouTube, <https://www.youtube.com/watch?v=tz-f9hGF9Kw>
- Rumford Medal, Britain's Royal Society, Award Winner 1824, Augustin Fresnel ; <https://royalsociety.org/grants-schemes-awards/awards/rumford-medal/>