

Augustin Fresnel (1788-1827)



Augustin Fresnel peut être considéré comme le père de l'optique moderne. Ses expériences sur l'optique et sur la nature de la lumière, ainsi que sa maîtrise des mathématiques, lui ont permis de démontrer que la conception ondulatoire de la lumière permet seule d'interpréter l'ensemble des phénomènes d'interférence et de diffraction.

Biographie

Augustin Fresnel est né le 10 mai 1788 à Broglie (dans l'Eure), ville dont son père, architecte, s'occupait de la rénovation du château. La famille Fresnel est janséniste, et les durs préceptes jansénistes auront une grande influence sur la vie d'Augustin. En 1790, après la Révolution, la famille se retire dans son village d'origine, à Mathieu, au nord de Caen. Comme ses 2 frères, Augustin Fresnel est éduqué pendant son enfance par ses parents.

Il est un enfant de santé délicate montrant des difficultés dans les études : il lit à peine à l'âge de 8 ans et éprouve de problèmes à mémoriser. Il est pris en main par son oncle Léonor Mérimée, peintre et chimiste, qui découvre en Augustin des talents qu'il faut développer.

A 12 ans il entre à l'École Centrale de Caen ; à seize ans et demi il accède à l'École polytechnique à Paris. Il est très inégal : presque nul en physique, mais excellent en mathématiques où il est remarqué par ses professeurs. Deux ans plus tard, il intègre l'École des Ponts et Chaussées.

Devenu ingénieur, son activité ne lui plaît guère ; la correspondance avec son oncle montre qu'administrer, gérer et mener les hommes au travail l'ennuie. C'est la recherche scientifique qui le passionne. Pour occuper son temps libre, il se met à réfléchir sur la nature des phénomènes lumineux et à réaliser des expériences pour les étudier.

Un des événements déterminants dans la carrière scientifique de Fresnel est paradoxalement de nature politique. En 1815, Napoléon est de retour de l'île d'Elbe. Fresnel apporte alors son soutien aux Bourbons, et s'engage dans une armée dirigée par le duc d'Angoulême. Fresnel en effet, comme beaucoup de ses camarades de l'X, se dressa publiquement contre l'Empereur, qualifiant les Cent Jours d' « attaque contre la civilisation ».

Après la victoire de Napoléon, durant la période des 100 jours, Fresnel est destitué de son poste d'ingénieur. Il se réfugie alors à Mathieu, et consacre ses quelques mois à sa nouvelle passion, l'optique. Sitôt Napoléon défait à Waterloo, il retrouve son poste d'ingénieur, et est nommé à Rennes. Mais il n'aura alors de cesse de solliciter des congés pour poursuivre ses travaux.

En effet, il exercera sa vie durant son métier d'ingénieur, mais en menant en parallèle des travaux scientifiques principalement dans le domaine de l'optique avec un matériel souvent très rudimentaire. « N'ayant pas à ma disposition pendant mes premiers essais de lentille plus forte, j'eus recours à un globule de miel que je déposai sur un petit trou pratiqué dans une feuille de cuivre ».

Les travaux de Fresnel en optique se situent dans le cadre de la théorie ondulatoire de la lumière. Il doute beaucoup de la nature corpusculaire de celle-ci, théorie alors plébiscitée et proposée presque un siècle auparavant par Newton, que seuls Huyghens et Young ont osé remettre en cause. Grâce à ses expériences et une analyse mathématique très poussée (il développe les célèbres intégrales de Fresnel), il parvient à démontrer la nature ondulatoire de la lumière pour interpréter les phénomènes de diffraction.

En 1819 un concours qui porte sur la diffraction est ouvert par l'Académie de Science. Le jury est plutôt rétif à la théorie ondulatoire. Fresnel y voit une chance unique d'exposer ses idées et méthodes novatrices. Un des membres du jury, Poisson, en poussant les calculs de Fresnel, parvient à une conclusion en apparence contradictoire: si on émet de la lumière perpendiculairement à un disque sombre, alors le centre de la zone d'ombre produite par ce disque est un point lumineux. Le président du jury ordonne la vérification expérimentale de cette prédiction, qui, à grande surprise du jury, est avérée. En 1823 Fresnel est le lauréat du Grand Prix de l'Académie des Sciences.

Homme aimant le côté expérimental des sciences, Fresnel était aussi passionné par les problèmes pratiques de l'optique. Employé par la commission des phares et des balises, il met au point une lentille à échelons (lentille de Fresnel) qui permet d'augmenter considérablement la luminosité et donc la portée des phares maritimes sans en augmenter l'encombrement et le poids. Le phare de Cordouan en Gironde ainsi équipé en 1823 voit sa portée passer de 15 à 60 km. Ce système est encore aujourd'hui utilisé dans les feux de circulation routière.

D'une santé fragile, Augustin Fresnel décède en 1827 des suites d'une tuberculose. Il avait à peine 39 ans : sa riche carrière scientifique n'a duré que 12 ans. Sur son lit de mort, il reçoit d'Arago la médaille Rumford de la Royal Society de Londres. « ... la plus belle couronne est peu de chose, quand il faut la déposer sur la tombe d'un ami. » dit-il à Arago.

Contexte scientifique : nature ondulatoire ou corpusculaire de la lumière ?

La nature de la lumière a toujours été une question mystérieuse.

Newton et la théorie corpusculaire

Parmi les pères fondateurs de l'optique figure Christian Huygens (1629-1695). Dans son oeuvre immense, il échauffa une théorie ondulatoire de la lumière : il pose le principe que chaque point d'un front d'onde émet des ondes sphériques dont l'enveloppe donne le front d'onde à un instant ultérieur.

Mais Newton, son contemporain, écrase Huygens, jeune continental qui l'insupporte (Huygens sera aux oubliettes jusqu'à ce que Fresnel l'en fasse revenir).

Newton décidera que la lumière est formée de corpuscules qui se déplacent à grande vitesse, car seuls des corpuscules peuvent se propager en ligne droite et expliquer les rayons lumineux (comme en mécanique, la lumière est constituée de molécules de lumières, émises par les corps lumineux. Cette idée s'impose, dit-il, car elle seule explique les rayons lumineux : les molécules de lumière se propagent en ligne droite). Certes, il côtoie et pratique les phénomènes d'interférences, mais il nie l'explication ondulatoire. Il attribue ces effets à des « accès de facile réflexion et de facile transmission » de la lumière.

La notoriété de Newton fut telle que personne n'osa la contester pendant presque un siècle.

Petit rappel sur la diffraction

La diffraction fut observée par hasard par un Père jésuite, Francesco Maria Grimaldi (1618-1663). Celui-ci, observant la lumière filtrant par un trou dans un volet, voit que le contour de l'image produite par un rayon de soleil, donc une « droite », n'est pas net! Elle est au contraire agrandie et les bords en sont colorés !



Figure : Diffraction par une ouverture circulaire.

Dans son traité, *Physico-mathesis de Lumine, coloribus et iride*, qui date de 1665 (deux ans après sa mort), il conclut : « La lumière ne se propage pas seulement suivant les modes direct, réfracté et réfléchi, mais aussi suivant un quatrième : la diffraction. » Dans ce dernier mode, les rayons sont « brisés ».

Retour de la théorie ondulatoire

Fresnel, plongé dans ses réflexions sur la nature de la lumière, demande des livres à son frère Léonor. Il veut se documenter, trouver des réponses à des questions que ses professeurs n'ont jamais abordées.

Arago, son ami et protecteur, lui écrit le 12 juillet 1815 : « *Je ne connais pas d'ouvrage qui renferme la totalité des expériences ...sur la lumière. M. Fresnel ne pourra se mettre au courant de cette partie de l'optique qu'en lisant l'ouvrage de Grimaldi, celui de Newton, ... et les mémoires d'Young* ». En effet, le médecin anglais Thomas Young (1773-1829) fut le premier à se livrer à la critique des idées de Newton, et à prôner un retour à l'hypothèse ondulatoire, à la suite de sa célèbre expérience d'interférences en 1802. Mais cela, Fresnel, en 1814, ne le savait pas !

Fresnel répond, le 23 septembre 1815, « *Quant à l'ouvrage d'Young, ..., j'avais fort envie de le lire, mais ne sachant pas l'anglais, je ne pouvais l'entendre qu'avec le secours de mon frère [Fulgence] et, après l'avoir quitté, le livre redevenait inintelligible pour moi.* »

Fresnel écrivit son tout premier mémoire, adressé à l'Académie des sciences le 15 octobre 1815,

Ce mémoire est d'abord une attaque en règle contre la théorie de Newton

- « *Newton radote* »)
- §3 : « *La théorie de Newton conduit à plusieurs hypothèses improbables* »

- §6 : « La double réfraction a obligé Newton de faire encore une hypothèse, qui est bien extraordinaire »
- §7 : « Il me semble que la théorie des vibrations se plie mieux que celle de Newton à tous les phénomènes.»
- §16 : « Cette conséquence (...) est tout à fait opposée à la thèse de Newton, et confirme la théorie des vibrations.»
- §26 : « Et c'est ce qui a été cause sans doute de l'erreur où est tombé Newton.»
- §42 : « Je tire de cette théorie une conséquence absolument opposée à celle de Newton.»

Grace à des mesures extrêmement précise et au développement d'outils mathématiques (intégrales de Fresnel), Fresnel arrive à donner une description complète du phénomène de la diffraction, où théorie ondulatoire de la lumière et expérience sont en complet accord (mémoire de Fresnel de 1818)

Principe de Huygens-Fresnel :

Chaque élément d'une surface d'onde peut être considéré comme émettant à son tour des ondes élémentaires. Mais la grande différence est que ces ondes vont interférer ce qui va expliquer les maxima et minima des franges d'interférences et de diffraction.

Méthodes de travail de Fresnel

Dans son grenier, Fresnel se met au travail avec un appareillage fait de ses mains. Le serrurier et le forgeron du village l'aident dans son entreprise.

Il observe d'abord l'ombre portée à longue distance d'un fil de fer éclairé par une source ponctuelle. Il intercepte un rayon de soleil filtrant par ses volets avec une lentille de forte courbure placée derrière un petit trou.

« Je me suis d'abord servi, pour obtenir un point lumineux, d'un très petit trou fait dans une feuille d'étain... N'ayant pas de plus forte lentille pour obtenir un point lumineux plus fin, je me suis servi d'un globule de miel déposé sur un petit trou fait à une feuille de cuivre. »

Le « fil de fer » est une fine lame biseauté sur chacun de ses côtés, ce qui permet de s'assurer que sa largeur est constante.

Pour mesurer la position des franges sur un écran (carton, verre dépoli) avec la plus grande précision, il fabrique un micromètre.

« J'ai construit un micromètre avec lequel je puis mesurer les largeurs des ombres à moins d'un quarantième de millimètre près. Il est formé de deux fils de soie partant d'un même point et aboutissant à deux points éloignés l'un de l'autre de cinq millimètres.... Un petit carton mobile me sert à marquer l'endroit où la distance des fils est égale à la largeur de l'ombre. Le cadre qui porte ces fils a 218 millimètres de longueur, je puis donc évaluer la distance entre les fils à moins d'un quarantième de millimètre. »

Fresnel et Young

De 1814 à 1815, Fresnel a travaillé sans connaître les travaux d'Young. Il est dépité d'apprendre en 1816 par Arago qui a visité l'Angleterre avec Gay-Lussac, après le baccalauréat, que les travaux d'Young, antérieurs aux siens, aboutissent aux mêmes résultats, mais il est beau joueur. Il écrira à Young « Ce que vous m'avez laissé à faire était aussi difficile que ce que vous aviez

fait. Vous aviez cueilli les fleurs, j'ai creusé avec peine pour atteindre les racines...

Il aura par la suite de nombreux échanges avec Young avec qui il se liera d'amitié.

Les travaux d'Young n'avaient en aucune façon la profondeur de ceux de Fresnel, ni sur le plan expérimental, ni sur celui de l'analyse théorique. Young, pragmatique, n'avait pas le talent expérimental de Fresnel, ni le sens de l'estimation des erreurs. Laplace a dit de lui: «*Young n'a jamais bien compris la différence qu'il y a entre un aperçu des choses et une véritable démonstration*»

On n'est pas sortie de l'auberge...

Double nature ondulatoire et corpusculaire de la lumière

En 1905 Einstein interprète l'effet photo-électrique avec sa théorie des quanta : la lumière est constituée de grains d'énergie (les photons) appelés quanta. La lumière possède alors un double caractère : ondulatoire et corpusculaire.

Certaines expériences s'interprètent en s'appuyant sur la nature ondulatoire de la lumière et d'autres sur sa nature corpusculaire. Difficile à concevoir...

Richard Feynman (Prix Noble physique 1965), dans son livre Lumière et matière résume, à sa

façon personnelle, ce dilemme :

« Suivit une période où l'intelligence des physiciens fut mise à rude épreuve : la lumière disait-on, doit-être considérée soit comme une onde, soit comme une particule, selon les conditions expérimentales. C'est ce qu'on a appelé la dualité onde-corpuscule. On a pu dire, de façon plaisante, qu'à cette époque la lumière était une onde les lundis, mercredis et vendredis, et un ensemble de particules les mardis, jeudis et samedis. Restait le dimanche pour réfléchir à la question. »

Voici une jolie interprétation de Cyberic Wollbrett de cette dualité :

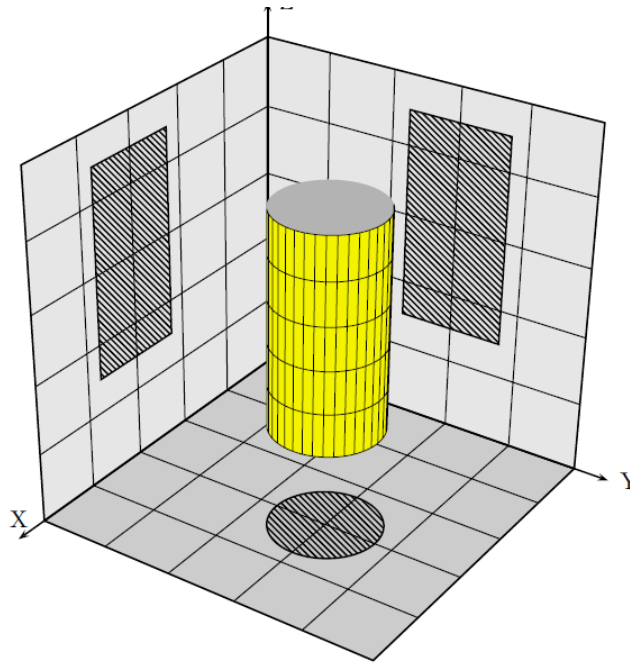


Figure 38: Cylindre et ses projections : regardé sous deux angles différents, un cylindre nous apparaît tantôt comme un cercle, tantôt comme un rectangle. Pourtant il n'est ni l'un ni l'autre.

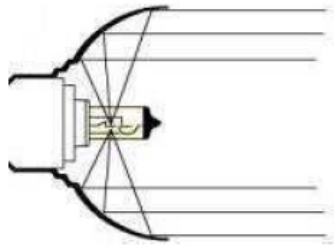
C'est à partir de 1919 qu'intervient Louis de Broglie dont le château familial à Broglie avait été restauré par le père d'Augustin Fresnel et où, par ce concours de circonstances, naquit Augustin en 1788 ! Louis de Broglie va faire la synthèse des ondes et des corpuscules et étendre la dualité ondes-corpuscules aux particules matérielles : une expérience célèbre par Davisson et Germer de diffraction avec des électrons (1927) confirmera sa thèse !

Pas que de la diffraction.... Les lentilles de Fresnel

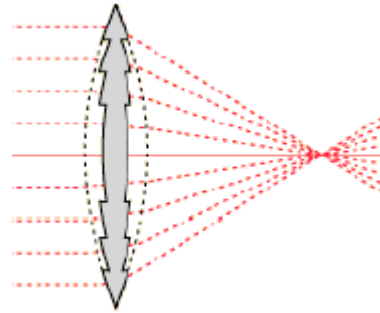
Le « Mémoire sur un nouveau système d'éclairage des phares » publié en 1825 par Augustin Fresnel et l'hydrographe Paul-Edouard de Rossel est le texte fondateur pour comprendre l'histoire de la signalisation maritime.

Avant les lentilles de Fresnel

A l'aube du XIXe siècle, il existe cent trente phares allumés dans le monde, dont la moitié dans les îles britanniques. La technologie plus performante connue à cette époque et développée autre Manche est celle des réflecteurs de cuivre, paraboliques ou sphériques : éclairés par des lampes à huile, ils réfléchissent la lumière.



Réflecteur parabolique



Lentille à échelon

La France n'ignore pas ce courant d'innovation

En 1782, l'ingénieur Teulère et le chevalier de Borda, savant et homme de mer, font appel à l'opticien Lenoir, pour concevoir un réflecteur parabolique argenté. L'essai de cet appareil, qui a lieu à Versailles en 1790, reçoit les encouragements du Roi et les applaudissements de la Cour. Douze miroirs paraboliques de 30 pouces (812 mm) montés sur une armature mobile sont installés à Cordouan en 1791.

Arago et Fresnel tentent un pari audacieux : changer radicalement la technologie d'éclairage des côtes.

Ayant remarqué que le phénomène de réfraction ne dépendait que de l'angle d'attaque du faisceau incident et du changement d'indice et non de la longueur du trajet dans un milieu d'indice, Fresnel invente une lentille dite « à échelon » qui ne conserve que le principe utile et devient donc beaucoup plus légère et plus facile à fabriquer. Leur qualité optique dépend du nombre de segments, donc de leur finesse.

Ces lentilles seront utilisées sur les phares afin de récupérer la lumière partant dans des directions inutiles afin d'augmenter l'intensité lumineuse donc leur portée.

Le Mémoire raconte le processus d'une innovation validée lors d'une expérience cruciale, dans la soirée du 13 avril 1821. La Commission des phares, installée « au sommet de Montmartre pour juger de l'effet produit » par les appareils en compétition, bascule cette nuit-là en faveur du système lenticulaire, dit de Fresnel, contre les projecteurs paraboliques de ses concurrents. Les réflecteurs de Lenoir installés à Cordouan sont démontés en 1823 : le phare de Cordouan en Gironde voit sa portée passer de 15 à 60 km.

La lentille à échelons de Fresnel trouva ainsi une application immédiate dans les phares maritimes, pour lesquels elle révolutionne l'éclairage. Elle fut également utilisée expérimentalement pour la sécurité ferroviaire naissante, afin d'éclairer les locomotives à l'aide de petits fanaux. Cent vingt ans plus tard, elle allait connaître une nouvelle utilisation, à d'autres phares, ceux des automobiles fabriquées à grande échelle.

Aujourd'hui, on en trouve des modèles souples bons marchés permettant une vision grand

angle sur les véhicules de type camping-car, les caisses de supermarchés pour vérifier le contenu de votre caddy, les spots lumineux de scène...

Bibliographie

Jean-Louis Basdevant, « Le Mémoire de Fresnel sur la diffraction de la lumière », *Bibnum*

- <http://bibnum.revues.org/749> <http://refletsdelaphysique.fr> ou <http://dx.doi.org/10.1051/refdp:2007003>
- <http://www.utc.fr/~tthomass/Themes/Unites/index.html>
-
- Les rÈvolutions de l'optique de J.& V. Rosmorduc et F. Dutour
- Cahier de Sciences&Vie N°5 : Fresnel, qu'est-ce que la lumiÈre ?