

FRESNEL et le PHARE de CORDOUAN : un génie en lumière

Augustin Fresnel (1788–1827) nous a laissé en héritage deux géniales inventions : la théorie ondulatoire de la lumière qui a ouvert la voie à la physique moderne et les lentilles à échelons qui équiperont pour la première fois le phare de Cordouan, avant d'être adoptées par la majorité des phares du Monde.

Augustin Fresnel et sa théorie ondulatoire de la lumière

Dès l'âge de 8 ans, le jeune Augustin Fresnel, né le 10 mai 1788, étonnait par son intelligence et son ingéniosité. A 16 ans, il intègre l'École polytechnique. En 1809, il est Ingénieur des Ponts et Chaussées de Département. Mais son travail administratif l'ennuie alors que les sciences l'attirent. Son ami, François Arago (1786–1853) qui avait intégré l'École polytechnique juste un an avant lui en 1803, l'encourage en 1814 à s'orienter résolument vers l'optique. Sans les connaître, il va retrouver les fameux résultats de Thomas Young (1723–1829) et observer comme lui des franges de diffraction avec très peu de moyens.

Ces franges d'interférence ne peuvent être interprétées par la théorie corpusculaire de la lumière proposée et imposée par l'immense notoriété d'Isaac Newton (1642-1727). Et Young ne peut les expliquer scientifiquement.

S'opposant frontalement à cette théorie, Fresnel va faire d'emblée l'hypothèse que la lumière est de nature ondulatoire. Au bout d'une année seulement, il va publier - le 15 octobre 1815 - la première démonstration rigoureuse et géniale de la théorie des ondes de lumière. Par une approche mathématique, il calcule les franges de diffraction et les franges d'interférence, et il explique dans ses Mémoires, non seulement la diffraction et les interférences (non expliquées par la théorie de Newton), mais aussi la réflexion et la réfraction de la lumière quand elle traverse un autre milieu, ainsi que la polarisation de la lumière par réflexion. Son Mémoire soumis le 29 juillet 1818 sera couronné par l'Académie des sciences.

La théorie de Fresnel portera un rude coup à la théorie corpusculaire selon Newton. Elle a ouvert la voie à la théorie classique de la lumière de Maxwell (1831-1879) et à la physique quantique. Les travaux de Fresnel, sur son incontournable théorie de la nature ondulatoire de la lumière, sont toujours d'actualité : les ondes sont partout !

Les lentilles à échelons de Fresnel et les phares

De frêle constitution et souffrant de tuberculose, Fresnel continue néanmoins de mener de front ses recherches théoriques et son travail d'ingénieur des Ponts et Chaussées, ce qui le fatigue et l'éloigne souvent de Paris, le lieu des échanges scientifiques. Pour lui permettre de se ménager et de continuer ses expériences remarquables, et remarquées par la direction des Ponts et Chaussées, il sera affecté à Paris en mai 1818.

Grâce au soutien d'Arago, membre éminent de la Commission des Phares et Balises - créée en 1811 à la demande de Napoléon -, il intégrera cette Commission le 21 juin 1819, poste qui lui convient beaucoup mieux et où ses connaissances en optique et son génie feront à nouveau merveille.



© Passion-Charente-Maritime – Isabelle Bollaert 2019

Il perfectionne d'abord les lampes d'éclairage avec Arago, et dès le 29 août 1819, il proposera l'utilisation de lentilles à échelons, les fameuses lentilles de Fresnel, qu'il mettra au point en deux ans pour équiper les phares en remplacement du système de miroirs paraboliques peu lumineux (60 % de perte du flux lumineux), extrêmement lourds, difficiles à réaliser, et qui ne satisfont ni la Commission ni les marins.



Lentille à échelons de Fresnel réalisée par Jean-Baptiste Soleil 1826 © Collections Ecole polytechnique

Le système optique conçu par Fresnel est plus complexe. Il est constitué de lentilles plan-convexes comportant des éléments annulaires concentriques de prismes de verre autour de sa partie centrale. Ces éléments, disposés séparément en échelons les uns au-dessus des autres, permettent d'alléger grandement le poids du verre des lentilles, les prismes permettant de mieux concentrer la lumière en un faisceau de rayons parallèles, ce qui augmente sa luminosité et sa portée.

Il réalisera, avec le maître opticien Jean-Baptiste Soleil (1798-1878), un petit prototype de lentilles à échelons pour démontrer la faisabilité de son système. Le test effectué en 1820 convaincra la Commission des Phares qui l'autorisera à faire réaliser un système plus grand dédié au phare de Cordouan.

Les tests réalisés en 1821 entre la Butte Montmartre et l'Observatoire de Paris, puis au sommet de l'Arc de Triomphe, sont extrêmement concluants.

Il présentera à l'Académie des sciences, le 29 juillet 1822, son « Mémoire sur un nouveau système d'éclairage des phares ».

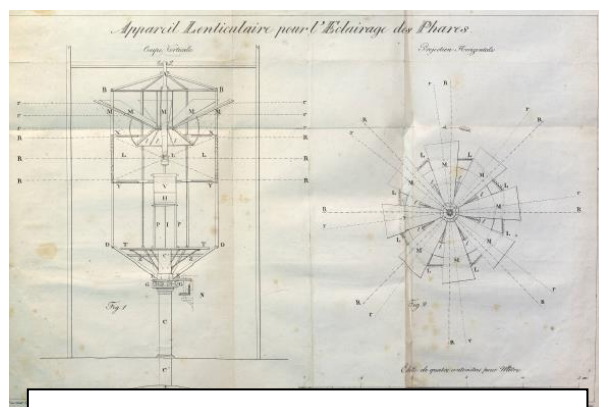


Schéma du système lenticulaire - mémoire présenté par Fresnel à l'Académie des Sciences, Paris, Imprimerie Royale, 1822 © Collections Ecole polytechnique

Le phare de Cordouan

Le 20 juillet 1823, le phare de Cordouan, premier phare équipé de lentilles à échelons (huit en tout, formant un prisme octogonal), va émettre un faisceau lumineux d'une portée passant de 10 à plus de 40 km, bien plus grande que n'importe quel autre phare de l'époque. Cela en fera de loin le plus lumineux des phares qui existaient dans le monde.

Le dispositif comporte un système de rotation, et en outre, le faisceau de lumière peut être fixe ou clignotant. Ce dispositif présente également l'intérêt d'être modulaire, ce qui le rend plus aisément démontable et transportable. On comprend que cette caractéristique ait pu contribuer fortement au succès industriel et commercial des lentilles de Fresnel dans le monde entier. L'éclairage était fourni alors par une lampe à huile, et le but initial assigné à Fresnel par la Commission des Phares était de l'améliorer, ce qu'il fit rapidement en le perfectionnant.

L'éclairage a beaucoup évolué depuis. Actuellement, l'éclairage est assuré par des ampoules de 250 W à halogénures métalliques. Un écran tournant à une fréquence de 12 secondes peut délivrer des faisceaux de lumière de trois couleurs différentes (blanc, rouge et vert), ce qui permet de mieux identifier le phare.

Le phare de Cordouan a été choisi tout naturellement pour accueillir le dispositif révolutionnaire de Fresnel. Situé à l'entrée de l'estuaire de la Gironde, c'est le plus vieux phare de France et le seul à être encore gardienné. La plateforme rocheuse, environnée de bancs de sable mouvants, sur laquelle il est construit est découverte à marée basse et recèle une exceptionnelle biodiversité. Le roi Henri III l'a commandé en 1584 à l'architecte Louis de Foix (1535-1602). Ce très bel édifice en pierre, de 68 m de hauteur, est officiellement achevé et livré le 28 avril 1611. Il a été classé monument historique en 1862. La tour de 68 m de hauteur est protégée des grandes vagues par un rempart circulaire de 8 m de haut. Un escalier à vis permet d'accéder aux 3 étages de la Tour jusqu'à la terrasse supérieure. L'édifice abrite une chapelle au 2^{ème} étage, et la chambre du roi au 1^{er} étage à l'entrée de laquelle on découvre près d'une cheminée, un buste d'Augustin Fresnel par David d'Angers.



On trouve également ce buste dans de nombreux phares en France. C'est un juste hommage rendu à cet homme modeste et attachant, ce génie qui a révolutionné l'optique et l'éclairage des phares, et contribué à sauver de nombreuses vies, de nombreux marins dans le monde entier, car son système lenticulaire – toujours utilisé – équipe la plupart des phares de notre planète. Fresnel est un bienfaiteur de l'humanité !

Buste d'Augustin Fresnel par Pierre-Jean David d'Angers ©
Collections Ecole polytechnique

Aujourd'hui

Les lentilles à échelons de Fresnel trouvent, encore aujourd'hui, de nombreuses applications : phares de voiture, projecteurs de cinéma et de spectacles, rétroviseurs de bus et de camions..., et plus récemment, on les utilise à l'échelle microscopique dans les nano-impressions 3D et en imagerie (voir ci-après). On les utilise également dans les panneaux photovoltaïques et les centrales solaires pour concentrer les rayons du soleil.

Augustin Fresnel, chercheur **ET** ingénieur, génial théoricien de la physique et expérimentateur de grand talent, est un exemple de la réussite du transfert des connaissances et des découvertes de la recherche fondamentale à l'innovation. En à peine une dizaine d'années de sa courte vie – il décéda de la tuberculose le 14 juillet 1827 -, Fresnel aura fait grandement progresser les sciences et les techniques de la lumière, et éclairé de ses bienfaits l'humanité !

Edmond AMOUYAL

Directeur de recherche émérite au CNRS
Laboratoire des Solides Irradiés (CEA/DRF/IRAMIS, CNRS/UMR 7642)
Ecole Polytechnique - Institut Polytechnique de Paris - Palaiseau

Pour en savoir plus :

[1] G. Mourou, M. Menu, M. Preti and E. Amouyal (Eds), *"Impressionism between art and science. Light through the prism of Augustin Fresnel (From 1790 to 1900)"*, Paris, Hermann Editeurs, 2020

[2] E. Amouyal, « *La lumière, une histoire d'amitié entre Fresnel et Ampère* », REE, N°2, 2021, p 84

<https://www.phare-de-cordouan.fr/>

Comme indiqué précédemment, la lentille réfractive à échelons d'Augustin Fresnel a été conçue pour des installations de très grande taille. Il est d'autant plus fascinant de voir qu'à l'autre extrême des échelles de longueur auxquelles nous fabriquons des optiques focalisantes, les principes que Fresnel a développés – tant dans le domaine de la théorie ondulatoire de la lumière que dans les principes pratiques de conception de lentilles « plates » – sont aujourd'hui mis au profit de la science dans le très petit, pour construire des lentilles d'un diamètre de l'ordre de 0,1 mm – correspondant à l'épaisseur d'un cheveu –, afin de focaliser le rayonnement X, cousin de la lumière visible mais dans des longueurs d'onde environ mille fois plus courtes que celle-ci. Cette technologie permet notamment de construire des microscopes à rayons X.

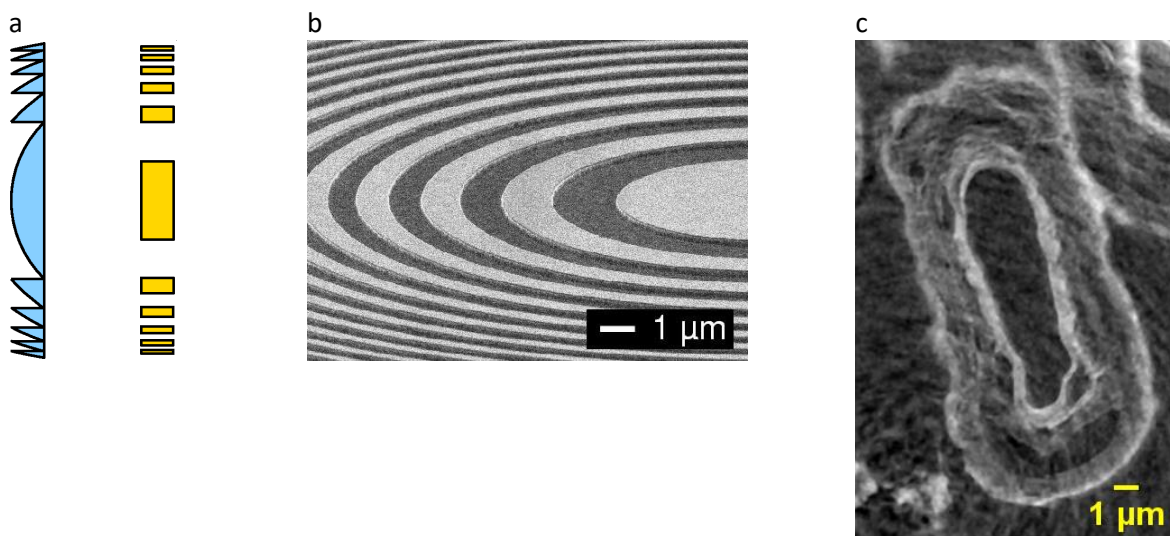


Figure : (a) A gauche (en bleu), profil d'une lentille réfractive à échelons type Fresnel. A droite (en jaune), profil d'une lentille diffractive de Fresnel. (b) Partie centrale d'une lentille diffractive pour rayons X (image par microscopie électronique à balayage). (c) Détail d'une image de nanotomographie montrant la section virtuelle d'une fibre minéralisée d'un textile de lin issu du site de fouilles archéologiques de Tello (Irak), image obtenue avec un microscope à rayons X sur la ligne de lumière ANATOMIX du Synchrotron SOLEIL (échantillon : musée du Louvre, département des Antiquités orientales, Ariane Thomas en collaboration avec Loïc Bertrand, Université Paris-Saclay, CNRS, ENS Paris-Saclay, PPSM et Mathieu Thoury, Université Paris-Saclay, CNRS, ministère de la Culture, UVSQ, MNHN, IPANEMA). L'imagerie de nanotomographie est employée dans cet exemple pour mieux comprendre les processus menant à la préservation exceptionnelle de ces textiles sur près de 5000 ans [6].

Contrairement aux grosses lentilles à échelons qui aident à guider les navires, les lentilles de Fresnel utilisées dans un microscope X ne fonctionnent pas par réfraction, mais par diffraction. Elles constituent en effet un réseau de diffraction en transmission dont la période diminue en fonction de la distance par rapport à l'axe optique, de manière à ce que tous les rayons diffractés dans un ordre de diffraction donné se rejoignent dans un seul point focal.

Bien que la première lentille fonctionnant sur ce principe ait été conçue et réalisée – pour la lumière visible et en utilisant du verre et de l'encre de chine – par le Genevois Jacques-Louis Soret en 1875 [1], c'est bien

une application directe des principes exposés par Augustin Fresnel dans son mémoire sur la diffraction, un demi-siècle plus tôt [2].

Fait curieux : La langue de ceux qui étaient à l'origine de ce développement ne connaît à ce jour pas de nom établi et caractérisé pour ce type d'élément optique, contrairement, par exemple, à l'anglais ou encore à l'allemand qui l'attribuent par ailleurs bien à Fresnel (*Fresnel zone plate* ; *Fresnelsche Zonenplatte*).

Si le principe de la lentille diffractive de Fresnel est utilisé dans les applications pour rayons X, c'est parce qu'il est difficile de fabriquer d'autres types de lentilles pour rayons X. Pour les lentilles diffractives, des méthodes de nanofabrication initialement développées pour la microélectronique ont été adoptées dès les années 1970 par deux pionniers du domaine, l'Allemand Günter Schmahl et l'Américain Janos Kirz [3][4], qui ont fini par réussir à construire les premiers microscopes pour rayonnement pénétrant basés sur ces petits objets. Le progrès en matière de nanofabrication a ensuite permis d'étendre la gamme de longueurs d'ondes atteignables de l'extrême ultraviolet, également appelé les « rayons X mous », vers des rayonnements beaucoup plus énergétiques jusqu'aux rayons X « durs » autour de 20 keV, qui nécessitent des structures plus profondes (sillons jusqu'à un micron de profondeur, alors que leur largeur au bord de la lentille n'est que de quelques dizaines de nanomètres), et donc plus difficiles à réaliser. Aujourd'hui, la France dispose de quelques microscopes RX de ce type, dont un au Synchrotron SOLEIL en région parisienne [5].

Timm WEITKAMP et Mario SCHEEL

Ligne de lumière ANATOMIX
Synchrotron SOLEIL, Gif-sur-Yvette

Références

- [1] J.-L. Soret, "Sur les phénomènes de diffraction produits par les réseaux circulaires", Archives des Sciences Physiques et Naturelles, Tome 52, 1875, pp. 320-337.
- [2] A. Fresnel, Calcul de l'intensité de la Lumière au centre de l'ombre d'un Écran et d'une Ouverture circulaires éclairés par un point radieux. Mémoires de l'Académie des Sciences de l'Institut de France. Tome 5 (années 1821 et 1822). Paris, 1826, pp. 456-464.
- [3] G. Schmahl, D. Rudolph, *Lichtstarke Zonenplatten als abbildende Systeme für weiche Röntgenstrahlen. Optik (Jena)*. Vol. 29, 1969, pp. 577-585.
- [4] J. Kirz: Phase Zone Plates for X-Rays and Extreme UV. In: Journal of the Optical Society of America. Vol. 64, N°3, 1974, pp. 301-309
- [5] M. Scheel, J. Perrin, F. Koch, V. Yurgens, V. Le Roux, J.-L. Giorgetta, K. Desjardins, C. Meneglier, S. Zhang, C. Engblom, C. Engblom, Y.-M. Abiven, G. Cauchon, C. Bourgoïn, A. Lestrade, T. Moreno, F. Polack, C. David, and T. Weitekamp, Toward hard X-ray transmission microscopy at the ANATOMIX beamline of Synchrotron SOLEIL, *Microsc. Microanal.* Vol 24, N°S2,2018, pp.246-247.
- [6] C. Reynaud, M. Thoury, A. Dazzi, G. Latour, M. Scheel, J. Li, A. Thomas, C. Moulherat, A. Didier, and L. Bertrand. In-place molecular preservation of cellulose in 5,000-year-old archaeological textiles. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, Vol. 117, N°33, 2020, pp. 19670-19676.

Voir aussi <https://www.synchrotron-soleil.fr/fr/lignes-de-lumiere/anatomix>.