

Augustin Fresnel

Christian Bracco¹ et Samuel Haspot²

L'œuvre d'Augustin Fresnel durant sa courte vie (il meurt à 39 ans) est impressionnante. Il montre qu'à partir d'une conception ondulatoire de la lumière on peut rendre compte de l'aberration stellaire, des phénomènes de diffraction, de la question jusqu'alors inexplicite de la polarisation de la lumière. C'est lui en particulier qui établit que les vibrations lumineuses s'exercent d'une manière transversale. On lui doit enfin une amélioration très importante de la portée des phares qui bordent nos côtes marines grâce à la mise au point de lentilles à échelons qui de nos jours portent son nom

Augustin Fresnel a contribué de manière déterminante à la connaissance de la nature ondulatoire de la lumière et au développement de l'optique. L'année 2015, année mondiale de la lumière, est l'occasion de revenir sur son œuvre. Son nom est bien évidemment associé aujourd'hui au principe de Huygens-Fresnel pour l'interprétation de la diffraction et des interférences. Mais nous rappellerons aussi les contributions de Fresnel à l'astronomie, de l'aberration des étoiles au prisme d'Arago, et la problématique relativiste qui en découle. Fresnel établit également le caractère transverse de la vibration lumineuse à travers l'interprétation des couleurs des lames cristallines et la description de la polarisation rotatoire découverte par Biot ; il donne l'expression des coefficients de réflexion en fonction de la polarisation et analyse le phénomène de réflexion totale. Fresnel est enfin connu pour avoir amélioré de façon très significative l'éclairage des phares côtiers, en les dotant du système de lentilles qui porte son nom. Fresnel, ingénieur, physicien et mathématicien, crée les outils dont il a besoin, tant sur le plan expérimental que théorique. Après lui, on parlera de « physique mathématique ».



Une brève présentation de la vie d'Augustin Fresnel

Il y a peu d'ouvrages consacrés à Fresnel, par manque d'informations à son sujet, en dehors principalement de l'éloge de son ami, l'astronome François Arago, reproduit dans les Œuvres complètes ([1] tome 3 pp. 475-526). Le lecteur intéressé pourra principalement se reporter à des ouvrages récents [2, 3, 4, 5], à un

recueil de textes publié en 1927 pour le centenaire de sa mort [6] tenu en présence d'éminents physiciens venus du congrès de Solvay, ou au texte d'une inauguration de 1847 [7].

Augustin Fresnel est né à Broglie, à une vingtaine de kilomètres au sud-ouest de Lisieux, le 10 mai 1788. Il meurt à l'âge de 39 ans, à Ville-d'Avray le 14 juillet 1827. Son père, Jacques Fresnel (1755-1805) est architecte, né à Mathieu, un petit village entre Caen et la côte, où la famille s'installe pendant la révolution. Sa mère, Augustine Mérimée, est la fille de François Mérimée, l'intendant du château de Broglie (famille du physicien). Son oncle, Léonor Mérimée, jouera un rôle important auprès d'Augustin : il est peintre et professeur de dessin à l'École Polytechnique. Il est le père de Prosper Mérimée, qui est donc le cousin d'Augustin. Augustin Fresnel a trois frères : Louis (1786-1809), lieutenant mort en Espagne ; Léonor (1790-1869), inspecteur général des Ponts et Chaussées et Fulgence (1795-1865), consul de France à Djeddah. Après leurs études à l'École Centrale de Caen (de 13 à 16 ans), Louis, Augustin (en 1804) et Léonor entrent successivement à l'École Polytechnique, où ils suivent les cours de Monge, Poisson et Legendre. Augustin poursuit aux Ponts et Chaussées (1806-1808).

Augustin Fresnel est d'abord envoyé en Vendée pour, d'après lui, « niveler de petites portions de route, chercher dans les environs des bancs de cailloux » en participant à la construction de La Roche-sur-Yon. Dès 1810, il s'intéresse à la chimie, en marge de son travail d'ingénieur, comme il l'écrit à son oncle Léonor. Il est nommé en 1813 dans la Drôme à Nyons, pour prolonger la route de Montgenèvre qui mène à Turin. En 1814, il demande des renseignements sur la polarisation à son frère Léonor et lui donne une explication de l'aberration des étoiles. Il fait remettre à André Marie Ampère (1775-1836) ses « Rêveries » par son oncle (manuscrit perdu). En mars 1815, il prend les armes aux côtés des Bourbons contre Napoléon. Destitué pendant les Cent jours, il se retire à Mathieu où il commence ses travaux sur la

¹ SYRTE, Observatoire de Paris, PSL Research University, CNRS, Sorbonne Universités, UPMC Univ. Paris 06, LNE, 61 avenue de l'Observatoire, 75014 Paris, France, CRHI, EA 4318, Université de Nice-Sophia Antipolis, UFR LASH, BP 3209, 98 Bd Hériot, 06204 Nice Cedex 3. cbracco@unice.fr

² Lycée des métiers Pierre Mendès France, 1 rue de Goussainville 95400 Villiers-Le-Bel, France. Samuel.Haspot@neuf.fr

diffraction et rédige un premier mémoire, qu'il envoie en 1815 à François Arago (1786 - 1853). Ce dernier mettra tout en œuvre pour aider Fresnel, en lui donnant accès au cabinet de physique de l'École Polytechnique et en lui obtenant des congés pour se consacrer à la recherche. Fresnel est réintégré par Louis XVIII, à Rennes puis, grâce à l'intervention d'Arago, à Paris. En 1819, il est nommé à la commission des phares et balises, qu'il ne quittera plus. Il est élu à l'Académie des sciences à l'unanimité en 1823. Sa santé a toujours été fragile, et suite visiblement à la surcharge de travail occasionnée par sa fonction d'examineur à l'École Polytechnique de 1821 à 1824, il est victime d'une hémoptysie, qui le conduit à arrêter ses recherches. En 1825, il est élu à la Société Royale de Londres. Thomas Young obtient pour lui la prestigieuse médaille de Rumford, qui lui est remise peu de temps avant sa mort. Cette reconnaissance vient clore une tension latente entre Young et Fresnel, ce dernier exprimant une certaine amertume dans une lettre de 1824 : « *Cependant, entre nous, je ne suis pas persuadé de la justesse de ce mot spirituel par lequel vous vous comparez à un arbre et moi à une pomme que cet arbre aurait produite : j'ai la conviction intérieure que la pomme aurait poussé sans l'arbre [...]* » ([1] tome 2, p. 770). La correspondance entre les deux hommes a été soutenue : elle compte une vingtaine de lettres entre 1816 et 1827. Fresnel citera notamment Young en rapport avec la transversalité des ondes lumineuses.

De l'aberration des étoiles au prisme d'Arago

Dès juillet 1814, Augustin Fresnel montre qu'il n'est aucunement besoin d'avoir recours à la théorie newtonienne (corpusculaire) de l'émission lumineuse, alors en vogue, pour rendre compte de l'aberration stellaire ([1] tome 2, pp. 820-825). Il établit qu'il ne s'agit là que d'un effet dû au mouvement de la lunette, celle-ci se déplaçant à la vitesse V avec la Terre pendant que la lumière se déplace à la vitesse c de l'objectif à l'oculaire. Par conséquent, le foyer de l'objectif joue le rôle de foyer secondaire quand la lumière de l'étoile lui parvient, expliquant ainsi que la direction « apparente » dans laquelle une étoile est perçue fait un angle $\delta\theta \approx V \sin \theta / c$ avec la direction « vraie ».

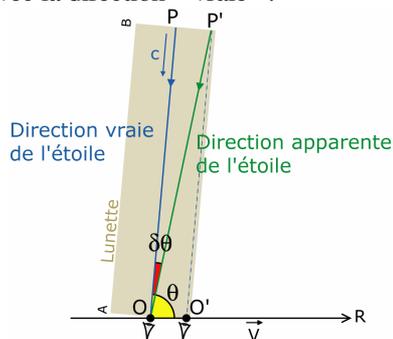


Fig.1. Aberration stellaire.

Fresnel écrit à son frère : « *Suppose que l'œil de l'observateur soit placé en O à l'extrémité d'une lunette AB dirigée vers une étoile fixe et de manière que son axe OP prolongé passe par le lieu vrai de l'étoile. Maintenant considérons l'effet qui résulte du mouvement progressif de la lumière et du mouvement de l'œil et de la lunette dans le sens OR. Imagine que l'extrémité de la lunette ne soit percée qu'au point P. – pendant que la lumière va de P en O, l'œil change de position, et se trouve en O' lorsque la lumière est arrivée en O, en sorte qu'il ne voit rien. – Mène en O' une parallèle à OP, suppose l'œil et la lunette retournés dans leur première position, et perce l'extrémité supérieure de la lunette au point P' : alors, en appliquant l'œil en O, tu verras l'étoile par le trou P' , parce que l'œil arrivera en O' aussitôt que la lumière qui passera par P' : et voilà pourquoi tu crois que l'étoile est dans le prolongement de la ligne OP', tandis qu'elle est effectivement dans la ligne OP [...]. L'hypothèse des vibrations s'accorde alors tout aussi bien que celle de Newton avec le phénomène de l'aberration des étoiles fixes, puisqu'il [...] suffit de reconnaître que la lumière met 8 minutes à venir du soleil à nous, et la terre une année à parcourir son orbite, ce qu'on admet également dans les deux hypothèses ».*

Dans une lettre de 1818 ([1] tome 2, pp 627-636), il répond à une question de François Arago, qui lui demandait d'interpréter, dans le cadre de la théorie ondulatoire, l'expérience du prisme. Il s'agissait pour Arago de viser une étoile, à son lever et à son coucher, ou à des périodes différentes de l'année, de manière à ce que la vitesse de la Terre (sa rotation diurne ou son mouvement orbital) se compose différemment avec la vitesse de la lumière provenant de l'étoile. Arago s'attendait à observer un déplacement du spectre lumineux de l'étoile formé par le prisme, la dispersion de celui-ci dépendant de la vitesse de la lumière. Or, à la précision des observations, à l'ordre V/c , aucun décalage n'était observé.

Fresnel établit par le calcul que si la vitesse de la lumière dans le prisme, qui se déplace à la vitesse V dans l'éther (milieu dans lequel les ondes lumineuses se propagent), est $c/n + V(1 - 1/n^2)$, où n est l'indice de réfraction du prisme, le changement d'angle des rayons lumineux à la sortie du prisme compense exactement l'effet d'aberration pour l'observateur (cf. [8] p. 541-542, pour une présentation détaillée). Il en tire la conclusion remarquable « *que le mouvement de notre globe ne doit avoir aucune influence sensible sur la réfraction apparente* ».

Pour tester la formule de Fresnel, Fizeau réalise en 1851 un interféromètre [9-11] sur la base de l'expérience des fentes d'Young (en montage de Fraunhofer). Les faisceaux parallèles parcourent les branches d'un tube en U horizontal où circule de l'eau,

dans le sens de l'écoulement pour l'un des faisceaux et dans le sens contraire pour l'autre. Partant du repos, les franges d'interférences (observées à l'oculaire) sont déplacées en des sens opposés lorsque le sens de l'écoulement est inversé. Fizeau commente ses observations : « *Ce résultat est ensuite comparé à ceux que l'on déduit par le calcul des diverses hypothèses relatives à l'éther. Dans la supposition de l'éther entièrement libre et indépendant du mouvement des corps, le déplacement devrait être nul. Dans l'hypothèse où l'éther serait uni aux molécules des corps, de manière à partager leurs mouvements, le calcul donne, pour le déplacement double [obtenu après inversion du sens de l'écoulement], la valeur 0,92. L'observation a donné un nombre moitié plus faible, ou 0,46. Dans l'hypothèse où l'éther serait partiellement entraîné, suivant la théorie de Fresnel, le calcul donne 0,40, c'est à dire un nombre très-voisin de celui qui a été trouvé par l'observation [...]* ». Cette formule sera interprétée en 1895, par le physicien hollandais Hendrik Antoon Lorentz, sur la base de l'introduction du « temps local » $t' = t - Vx/c^2$, prélude à la théorie de la relativité restreinte [8, 12]. Quant aux corps opaques, ils doivent laisser passer librement l'éther, pour expliquer l'aberration, ce que Michelson et Morley tenteront de mettre en évidence en 1887 avec leur célèbre interféromètre. Comme cela est bien connu, Lorentz introduira la contraction des longueurs dans le sens du mouvement pour expliquer, de manière *ad hoc*, l'impossibilité de mettre en évidence ce « vent d'éther », *i.e.* le mouvement de la terre par rapport à l'éther considéré comme un référentiel absolu. L'explication générale viendra avec la théorie de la relativité restreinte.

L'interprétation ondulatoire de la diffraction

La diffraction de la lumière a été mise en évidence dès le XVII^e siècle par Francesco Grimaldi (1618-1663) [13]. Toutefois, il faut attendre le début du XIX^e et les travaux de Fresnel pour avoir une explication convaincante du phénomène.

Au début du XIX^e siècle, les physiciens balayaient l'hypothèse de la nature ondulatoire de la lumière par le fait que celle-ci ne contournait pas les obstacles. C'est justement cet argument qui a poussé Fresnel, non convaincu par la théorie corpusculaire de Newton, à étudier les ombres. Il reproduisit avec un fil de fer une expérience de Grimaldi, qui s'était placé dans une pièce obscure, avait percé un trou dans son volet, et placé un petit objet sur le trajet des rayons lumineux. Ce dernier avait comparé la taille de l'ombre formée sur une feuille blanche, à celle prévue géométriquement et observé une différence. Il avait également remarqué la présence de raies colorées non seulement

en dehors de l'ombre, mais aussi à l'intérieur de celle-ci. Fresnel s'intéresse dans un premier temps aux franges extérieures et remarque qu'elles ne se situent pas sur des droites mais sur des branches d'hyperbole. En plaçant un petit carré de papier noir sur un des côtés du fil, il remarque que les franges intérieures disparaissent.

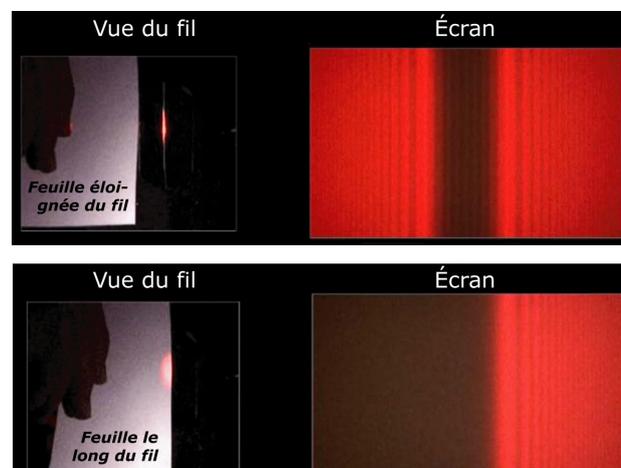


Fig.2. Disparition des franges intérieures lorsqu'on approche un obstacle d'un des bords du fil (figure de diffraction du bord d'écran) [11].

De cette expérience il en déduit une première interprétation qu'il développera dans son mémoire de 1815 ([1] tome 1, pp. 9-34). Il considère les bords du fil comme des sources secondaires, et le phénomène de diffraction observé se réduirait alors à un phénomène d'interférences, entre les ondes lumineuses émises par les bords de l'obstacle pour les franges intérieures, et entre l'onde issue de la source et celles émises par chacun des bords pour les franges extérieures de part et d'autre de l'ombre. Il précise dans son mémoire : « *J'ai considéré le point lumineux, et les deux bords du fil, comme des centres d'ondulation régulière, et les intersections de leurs cercles devaient me donner la position des franges* ». Pour les franges extérieures Fresnel considère un point F extérieur à l'ombre et note x sa position à partir du bord de l'ombre. Il exprime alors les longueurs du rayon provenant de la source et parvenant au point F et des rayons passant par le bord du corps en fonction de x , de la distance a entre la source et l'obstacle et de la distance b entre l'obstacle et l'écran. Pour les franges intérieures, Fresnel prend un point M intérieur à l'ombre, note y sa position et décrit les ondes par des cercles concentriques. Il détermine alors la position des centres des franges intérieures et extérieures en introduisant les différences de marche entre les rayons, et en considérant qu'on a des interférences constructives pour les centres des franges brillantes, et des interférences destructives pour les franges sombres. La position des franges obtenues par le calcul semble en accord avec l'observation, à savoir : des franges lumineuses équidistantes et de même

largeur pour les franges intérieures, et des franges lumineuses de plus en plus proches et de moins en moins larges au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'obstacle pour les franges extérieures. Cependant, Fresnel se rend compte que la position des franges brillantes et sombres est « *presque exactement inverse de celle que donne l'expérience* ». Il propose alors une solution qui consiste en une correction d'une demi-ondulation. Les ondes secondaires, émises au niveau de l'obstacle, ne sont plus en phase avec l'onde incidente. Les valeurs obtenues après correction semblent alors bien s'accorder avec les valeurs expérimentales.

Si son premier modèle lui semble correct, Fresnel, qui cherche toujours à augmenter la précision de ses mesures, conçoit ensuite un micromètre très précis et réalise à nouveau ses expériences en lumière monochromatique produite avec un vitrail de très bonne qualité. Il se rend alors compte que sa première interprétation ne peut convenir : « *On ne peut attribuer les phénomènes de la diffraction aux seuls rayons qui touchent les bords des corps* ». Fresnel élabore alors la théorie des rayons efficaces, qu'il développera dans le *Supplément au deuxième mémoire sur la diffraction de la lumière* en juillet 1816 ([1] pp. 129-170). Il prend sur l'écran un point *P* intérieur à l'ombre. Il divise le front d'onde de l'onde arrivant au bord de l'obstacle en une infinité de petits arcs, de sorte que les rayons qui en sont issus et arrivent en *P* diffèrent d'une demi-ondulation. C'est la méthode des « zones de Fresnel » en optique. Si l'on considère que deux rayons suffisamment éloignés de l'obstacle peuvent être considérés comme parallèles, il en résultera que « *leurs effets se détruiront mutuellement* ». En généralisant ceci à l'ensemble du front d'onde, seuls deux arcs (les plus proches des deux bords de l'obstacle) « *produiront un effet sensible* ». Il restreint ainsi le problème à deux rayons dont la source se déplace sur ces deux arcs selon la position du point sur l'écran (et qui sont donc désolidarisés des bords de l'écran). Si cette approche ne permet pas de déterminer aussi précisément que souhaité les positions des franges, elle constitue une première étape vers le fameux principe, appelé depuis de Huygens-Fresnel, que Fresnel introduit dans son mémoire de 1818, couronné par l'Académie des sciences ([1] tome 1, pp. 247-364). Chaque point atteint par l'onde lumineuse se comporte comme le centre d'une nouvelle source d'ondes sphériques (dans un milieu homogène et isotrope) et « *il faut admettre qu'une infinité d'autres rayons séparés de ces corps par des intervalles sensibles [...] concourent aussi à la formation des franges* ». Le calcul, qui prend en compte une infinité de sources secondaires interférant au point considéré, nécessite la connaissance de nouvelles intégrales, appelées « intégrales de Fresnel », dont Fresnel calcule les tables de valeur.

Leur représentation dans le plan complexe est connue en optique sous le nom de « spirale de Cornu » [14]. Notons que cette courbe est aujourd'hui utilisée pour la construction des échangeurs d'autoroute, du fait de la proportionnalité de sa courbure avec l'abscisse curviligne. Elle est encore appelée « clothoïde » [15], en lien avec Clotho qui filait la destinée des hommes, cette courbe semblant reproduire l'enroulement de la laine sur un métier à tisser. Fresnel aurait été amusé d'apprendre l'utilisation de ses intégrales dans son métier d'origine !

La transversalité de la vibration lumineuse

En quoi consiste la polarisation de la lumière par réflexion vitreuse découverte par Etienne Louis Malus en 1810 et qui permet d'expliquer les propriétés, connues depuis Huygens [16], des faisceaux lumineux après la traversée d'un milieu biréfringent ? La lumière étant une onde, la composante de la vibration est-elle longitudinale et/ou transversale ? Fresnel considère un dispositif d'interférences (fentes d'Young) et polarise les faisceaux après chacune des fentes. Il conclut dès 1819 ([1] tome 1 p 521) : « *Les expériences que nous venons de rapporter conduisent donc en définitive aux conséquences suivantes :*

1° *Dans les mêmes circonstances où deux rayons de lumière ordinaire paraissent mutuellement se détruire, deux rayons polarisés en sens contraires n'exercent l'un sur l'autre aucune action appréciable ;*

2° *Les rayons de lumière polarisés dans un seul sens agissent l'un sur l'autre comme les rayons naturels : en sorte que, dans ces deux espèces de lumières, les phénomènes d'interférences sont absolument les mêmes ;*

3° *Deux rayons primitivement polarisés en sens contraires peuvent ensuite être ramenés à un même plan de polarisation, sans néanmoins acquérir par là la faculté de s'influencer ;*

4° *Deux rayons polarisés en sens contraires, et ramenés ensuite à des polarisations analogues, s'influencent comme les rayons naturels, s'ils proviennent d'un faisceau primitivement polarisé dans un seul sens [en italiques dans le texte] ».*

Cette expérience est connue sous le nom d'expérience de Fresnel-Arago. Mais ce n'est qu'en 1821 que Fresnel ose l'explication ([1] tome 1 pp. 629-630) : « *Nous sentîmes l'un et l'autre [avec Ampère] que ces phénomènes s'expliqueraient avec la plus grande simplicité, si les mouvements oscillatoires des ondes polarisées n'avaient lieu que dans le plan même de ces ondes. Mais que devenaient les oscillations longitudinales suivant les rayons ? Comment se*

trouvaient-elles détruites par l'acte de polarisation [...]. Ce n'est que depuis quelques mois qu'en méditant avec plus d'attention sur ce sujet, j'ai reconnu qu'il était probable que les mouvements oscillatoires des ondes lumineuses s'exécutaient uniquement suivant le plan de ces ondes, pour la lumière directe comme pour la lumière polarisée ». Cette transversalité de la vibration lumineuse lui permet alors d'expliquer les couleurs des lames cristallines. Elles résultent des interférences constructives de la lumière polarisée rectilignement dont la direction de polarisation se décompose, à l'entrée de la lame, suivant les lignes neutres perpendiculaires de celle-ci. Ces deux composantes traversent la lame avec des vitesses différentes et acquièrent un déphasage proportionnel à l'épaisseur de la lame. À la sortie, un analyseur ramène les deux directions perpendiculaires sur une direction commune, permettant l'interférence des deux ondes [11].

Fresnel déduira que le pouvoir rotatoire de certains cristaux ou liquides peut être considéré comme une biréfringence circulaire en décomposant la polarisation rectiligne incidente en deux polarisations circulaires (droite et gauche), se propageant dans le milieu avec des vitesses différentes. La recombinaison avec un analyseur à la sortie met en évidence une rotation de la direction de polarisation initiale, fonction de l'épaisseur traversée et de la longueur d'onde.

Il calculera les coefficients de réflexion et de transmission en lumière polarisée, sur la base d'un modèle mécanique de l'éther permettant de propager une vibration transverse, en utilisant la conservation de l'énergie et la continuité de la vitesse des molécules d'éther à l'interface entre deux milieux réfringents.

Dans le cas du passage d'un milieu plus réfringent à un milieu moins réfringent, pour une valeur de l'angle d'incidence supérieure à celle de l'angle limite, il étudiera le phénomène de réflexion totale, fonction de la polarisation. Il introduira dans son analyse les nombres « imaginaires » pour rendre compte des valeurs prises par les fonctions sinusoïdales ; on parle aujourd'hui d'onde évanescente de Fresnel.

Phares et lentilles de Fresnel

Le système d'éclairage des phares côtiers était jusqu'à Fresnel basé sur des réflecteurs (catoptriques) constitués de miroirs paraboliques. Le type de source et les pertes de la lumière collectée entraînaient une portée modérée des phares. Si les ingénieurs avaient conscience qu'ils gagneraient à utiliser la réfraction de la lumière, comment concevoir un système de grande dimension, de courte focale, à la fois léger et facilement réalisable ? Si l'idée des lentilles à échelon

est attribuée à Buffon, et celle de leur réalisation, en utilisant des morceaux de lentille, du moins théoriquement, à Condorcet, c'est cependant Fresnel qui réalise les premières lentilles de ce type, en collant sur un même plan des anneaux concentriques de rayons de plus en plus grands et de même focale.

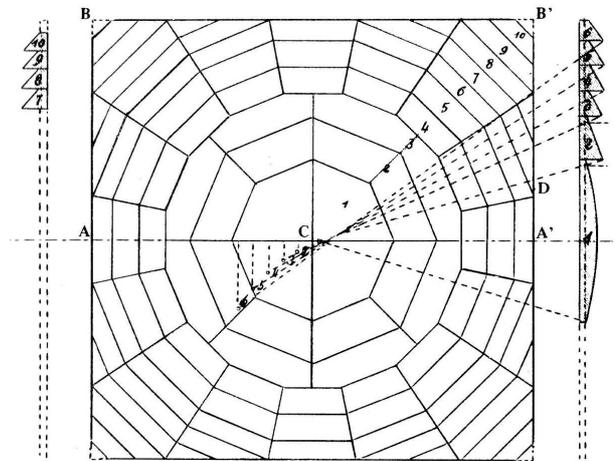


Fig.3. Plan et profils d'une lentille échelonnée à zones polygonales de 76 cm de côté et de 92 cm de foyer, ([1] tome 3).

Utilisant les meilleurs verres, dessinant son propre système d'assemblage des lentilles (et découvrant la biréfringence provoquée à cette occasion), il réalise une première lentille testée avec succès sur l'Arc de Triomphe en 1821. Peu après, le système de lentilles de Fresnel équipe tous les phares côtiers, non seulement en France, mais aussi à l'étranger. La marine lui témoigne sa reconnaissance en baptisant, du nom de Fresnel, un sous-marin en 1929. La portée des phares devient dès lors bien supérieure à ce qu'elle était et la limitation n'est plus due qu'à la rotondité de la Terre. Fresnel améliore au passage le dispositif d'éclairage et de codage des phares.

Les travaux scientifiques de Fresnel en optique couvrent à peine une dizaine d'années, entre 1814 et 1824. Il n'en demeure pas moins que son œuvre, dans toutes les parties qu'il a abordées, est toujours d'actualité.

Remerciements : L'un des auteurs (C.B.) tient à remercier tout particulièrement Gisèle Krebs, son ancien professeur à l'École Normale Supérieure de Cachan, pour lui avoir fait découvrir les travaux de Fresnel, en particulier au cours de la réalisation du *cédérom Histoire des idées sur la lumière*, et pour ses remarques.

Bibliographie [1] à [16].

Vous trouverez toutes les références sur le site du CLEA. ■