



Les premières lentilles de Fresnel

Patrice Lehuédé

Le 09 décembre 2011

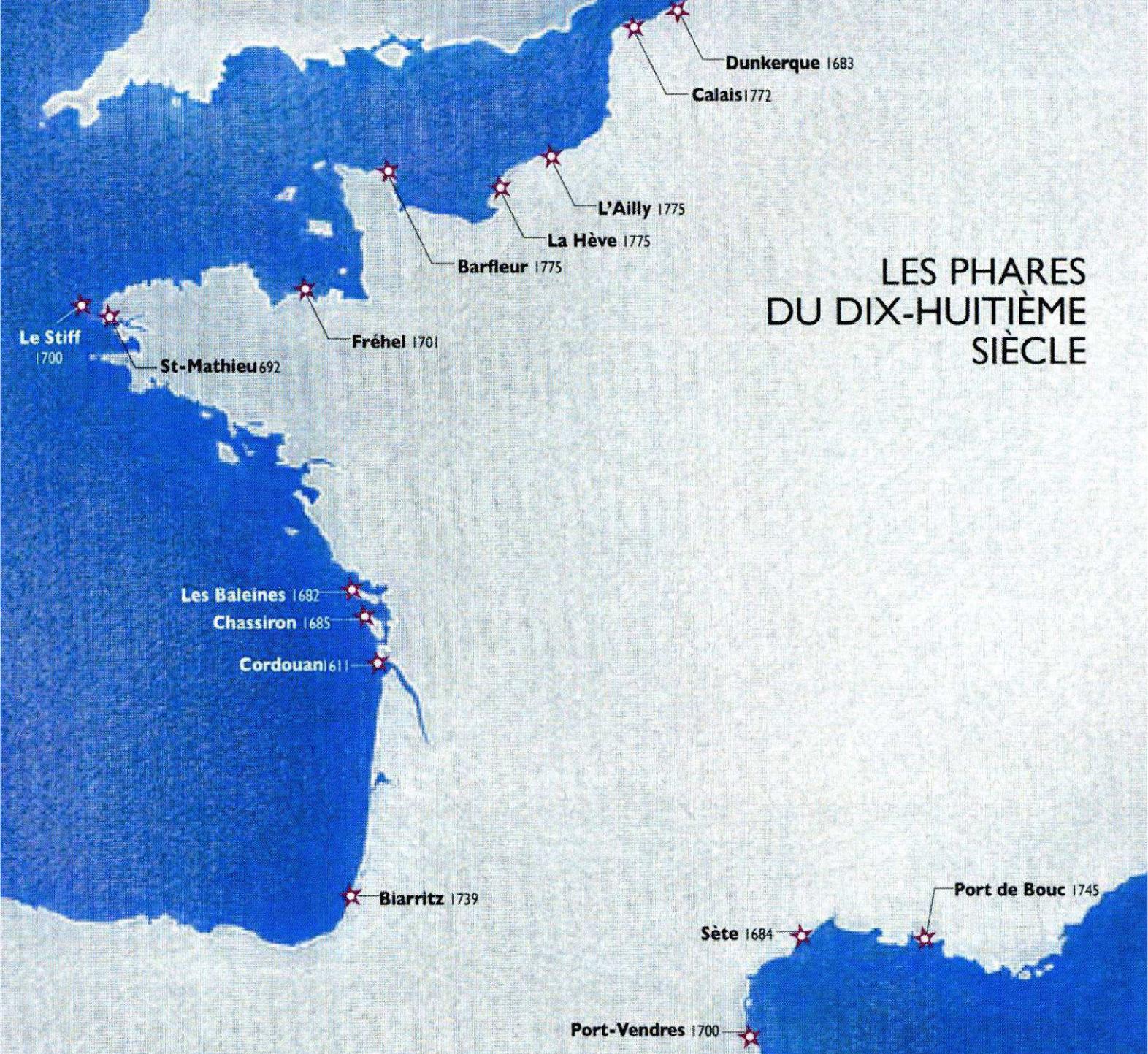
CENTRE DE
RECHERCHE
ET DE
RESTAURATION
DES MUSÉES
DE FRANCE

Contexte historique

- Début 19^{ème} siècle, peu de systèmes d'éclairage équipaient les côtes françaises,
- création, en 1811, d'une Commission des phares par le comte Mole, directeur général des Ponts et Chaussées. La Commission ne devint réellement active qu'après la chute de Napoléon, quand elle organisa des expériences scientifiques comparant l'efficacité de différents systèmes d'éclairage.
- Cette Commission était composée de neuf membres :
 - trois savants de l'Académie des Sciences,
 - trois inspecteurs des Ponts et Chaussées,
 - trois officiers supérieurs de la marine militaire.

Elle a joué un rôle important dans l'organisation du système de signalisation sur l'ensemble des côtes françaises.

LES PHARES DU DIX-HUITIÈME SIÈCLE



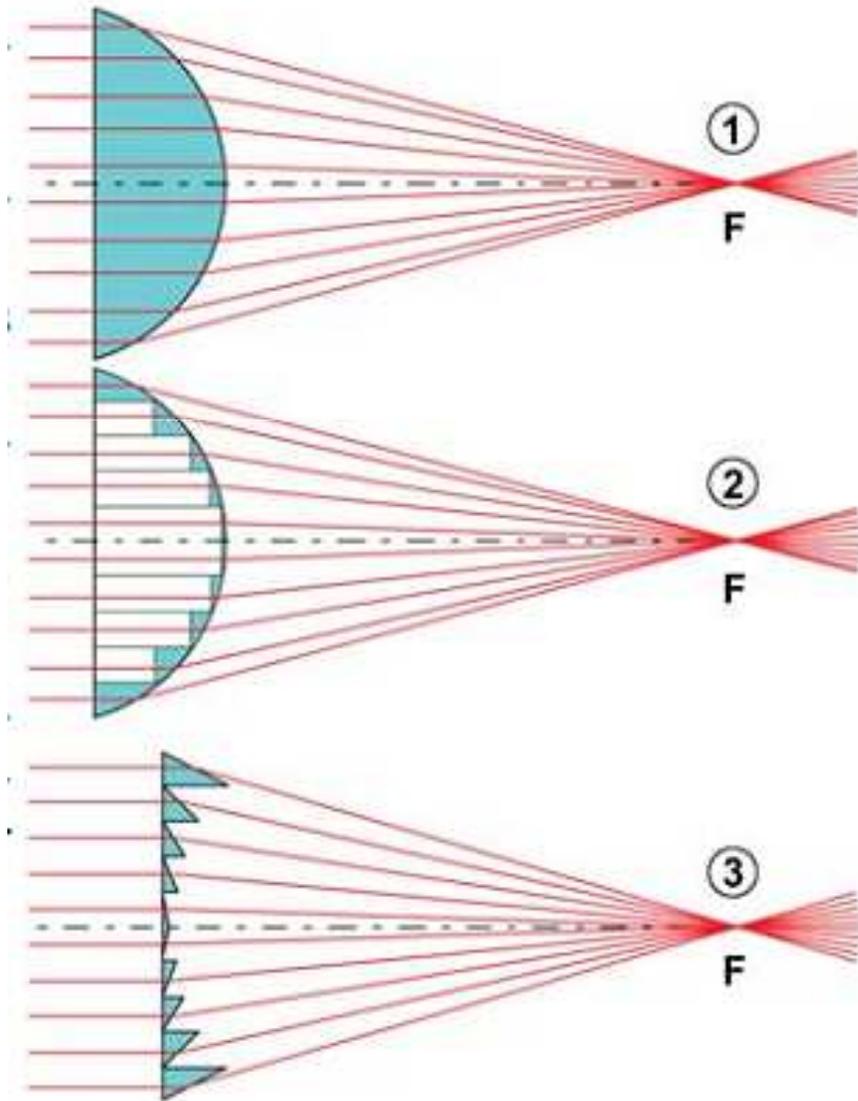


Le programme d'éclairage de 1825
 In *Phares, histoire du balisage et de l'éclairage des côtes de France*. Jean-Christophe Fichou, Noël Le Hénaff, Xavier Mével. Douarnenez, Chasse-marée, 2003, p.95

Quelques dates

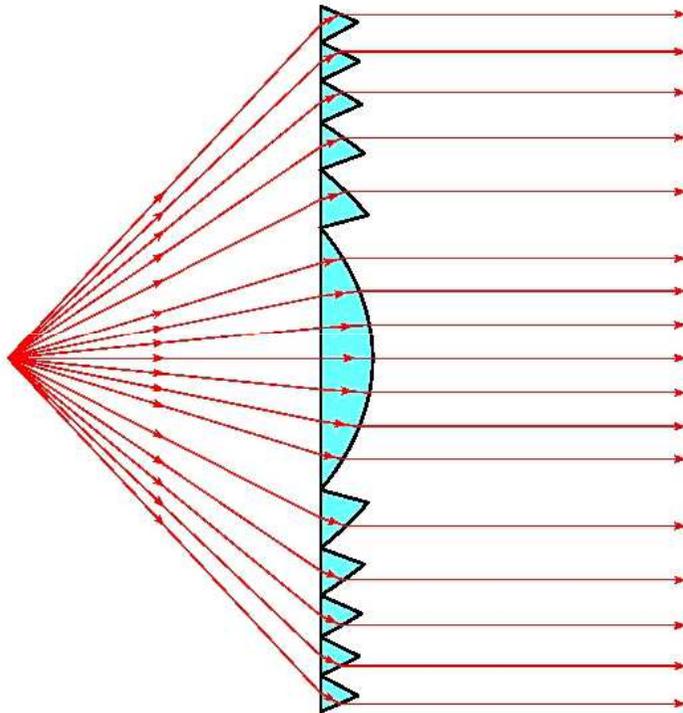
- Fresnel entre à la commission des phares (sur proposition d'Arago) le **21 juin 1819**,
- Le **29 août 1819**, il écrit un rapport sur l'amélioration de l'éclairage des lampes de phare et préconise le emplacement des réflecteurs métalliques par des lentilles à échelons (54 cm de côté, 60 cm de focale),
- En octobre la commission donne son accord pour la construction d'une première lentille,
- Le premier test est effectué le **1er mars 1820**,
- Une seconde lentille est commencée (55 cm de côté et 70 cm de focale) ; elle est testée en **mai 1821**,
- Le **31 octobre 1821**, Fresnel présente à la Commission des Phares un avant projet de phare à 8 optiques dioptriques,
- Ce projet est approuvé et le phare de Cordouan est installé et mis en marche en **juillet 1823**.

Lentilles de Fresnel (ou à échelons)



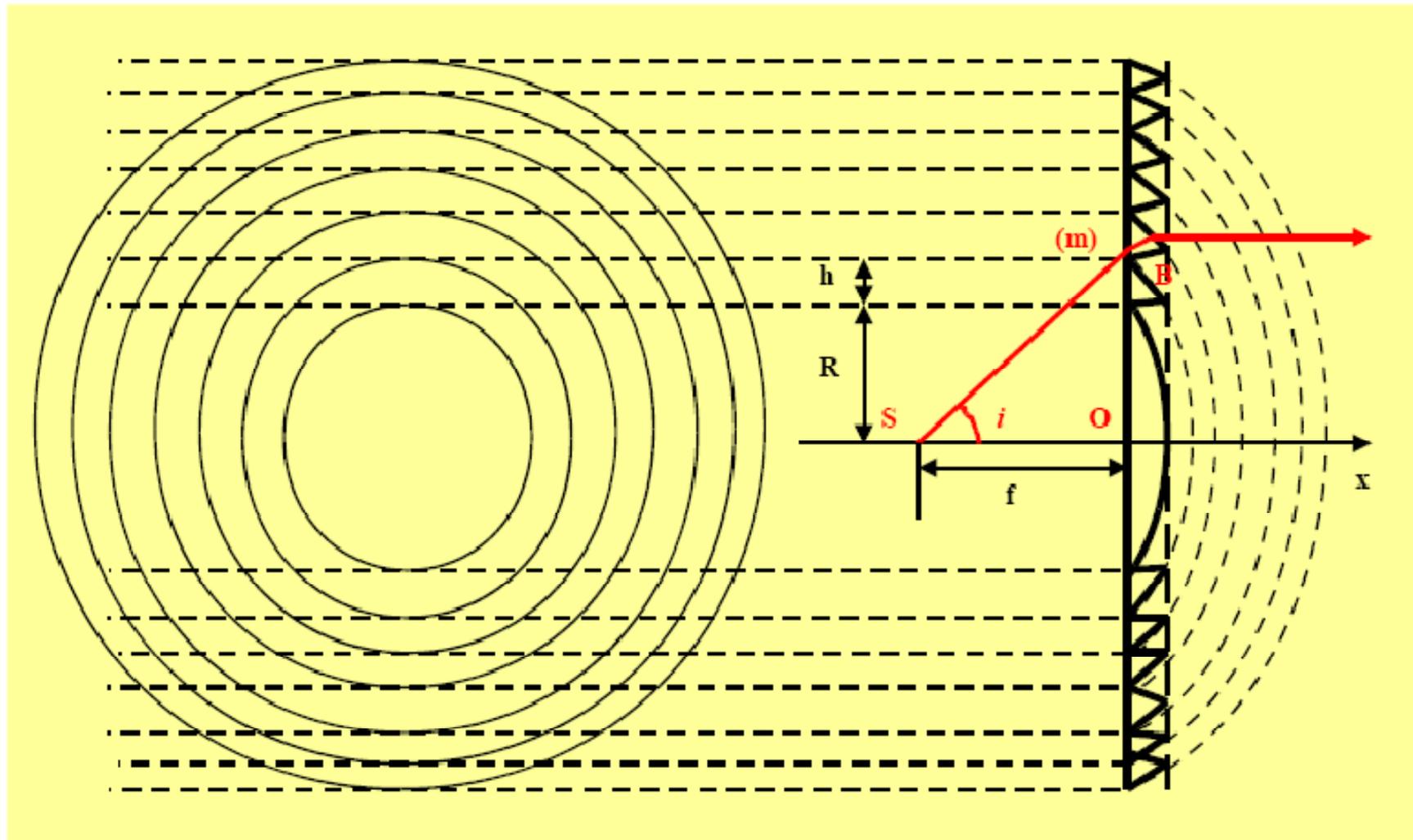
Le principe consiste à enlever à une lentille « classique » tout le verre inutile.

Les lentilles de Fresnel

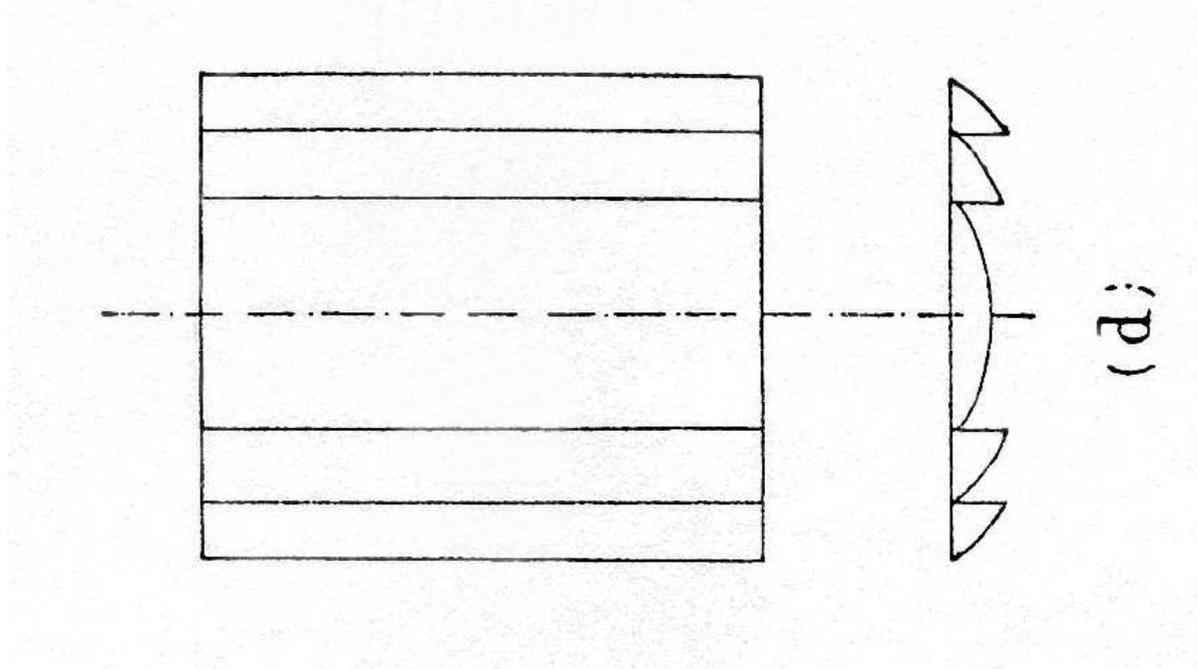


Feu à éclats : symétrie axiale (système à anneaux concentriques)

Les lentilles de Fresnel



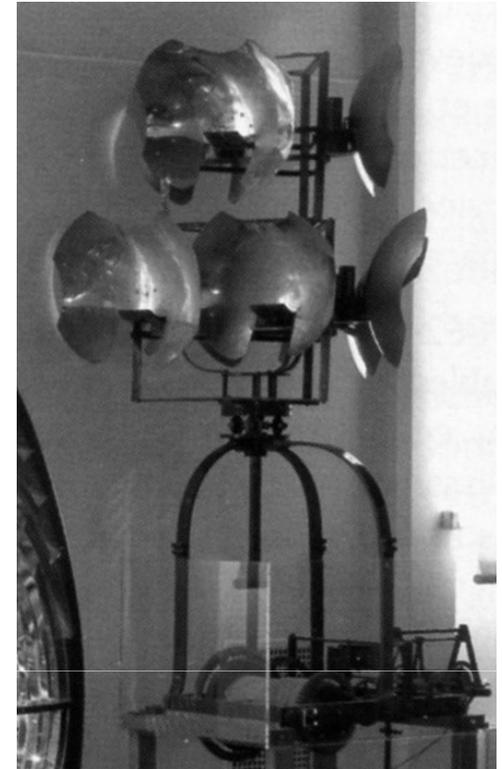
Les lentilles de Fresnel



Feu d'horizon : symétrie plane

Historique des premières réalisations

- Avant ~1824, et depuis au moins 30 ans, on utilisait pour les phares des feux à réflecteurs paraboliques en métal poli, (12 de 812 mm sur armature mobile pour le phare de Cordouan),
- Fresnel montra par le calcul la supériorité de son système,
- Et organisa une comparaison entre ces réflecteurs et ses lentilles le **13 avril 1821** à Montmartre.



Bataille : lentilles / réflecteurs

- Fresnel estime que les 8 lentilles prévues pour le phare de Cordouan représentent 0.38 de la surface de la sphère émettrice (0.34 si on tient compte de l'absorption par le verre),
- Les réflecteurs embrassent 0.7 de la surface de la sphère lumineuse (0.6 si on tient compte de l'absorption par le bec), mais l'absorption par le métal poli est de 50%. La lumière récupérée est donc de 0.3 de la lumière émise,
- Il y a donc un léger avantage en faveur des lentilles (Mémoire lu à l'Académie des Sciences le [29 juillet 1822](#)),
- Autres avantages des lentilles : meilleure focalisation du faisceau lumineux, économie d'huile, possibilité de passer à l'éclairage au gaz, **beaucoup moins d'entretien du fait de l'inaltérabilité du verre.**

MÉMOIRE
SUR
UN NOUVEAU SYSTÈME D'ÉCLAIRAGE
DES PHARES;

PAR M. A. FRESNEL,
INGÉNIEUR AU CORPS ROYAL DES PONTS ET CHAUSSÉES, ANCIEN ÉLÈVE
DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE;

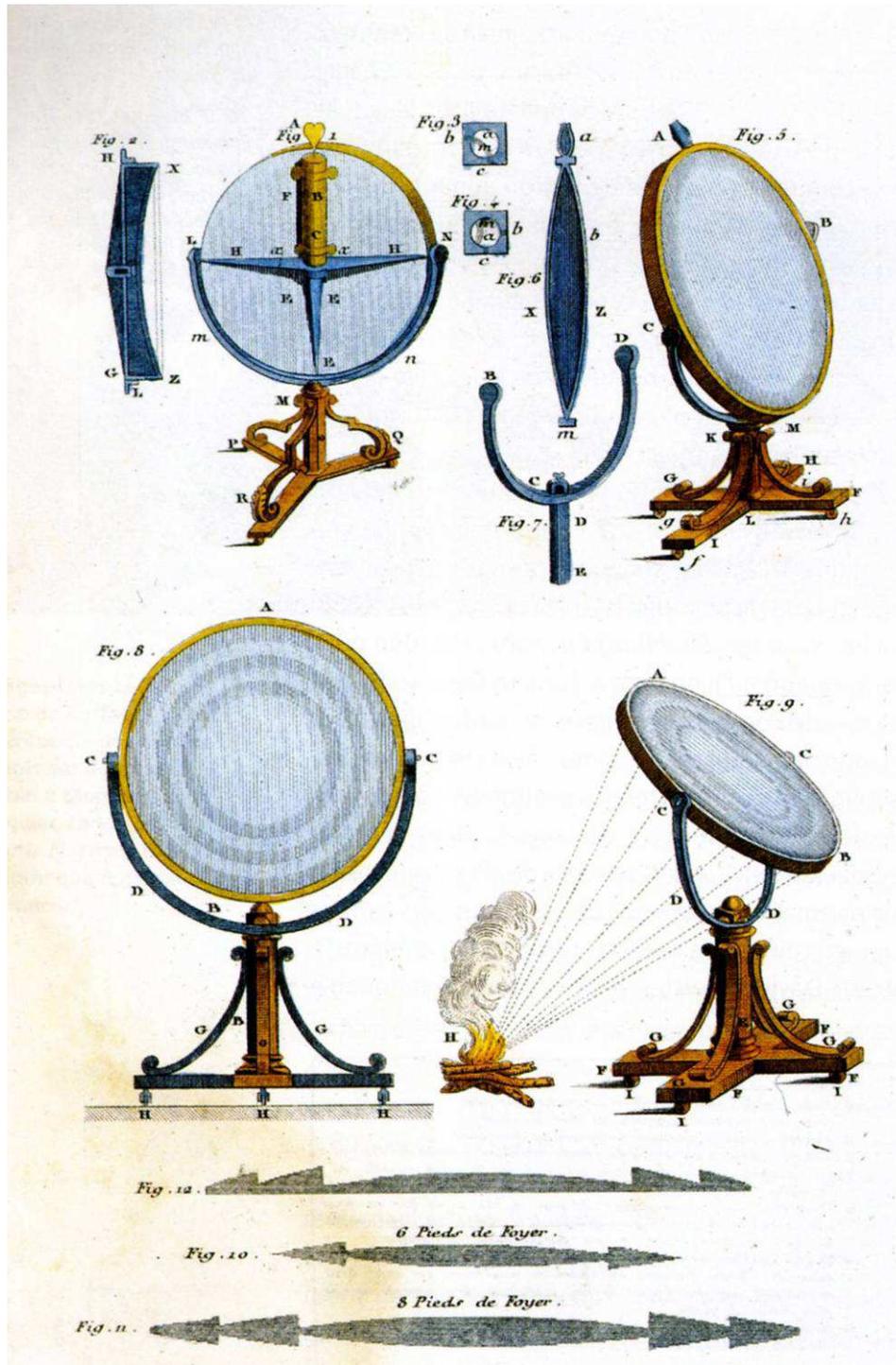
LU À L'ACADÉMIE DES SCIENCES, LE 29 JUILLET 1822.



A PARIS,
DE L'IMPRIMERIE ROYALE.

1822.

**Mémoire de Fresnel
présenté à l'Académie
des Sciences en 1822**



Lentilles à eau et lentilles à échelons de Buffon (extrait des œuvres complètes de Georges L. de Buffon, Garnier frères, vers 1850)



Présentation du miroir ardent de Villetelle au roi Louis XIV (gravure de Sébastien Leclerc en 1677)



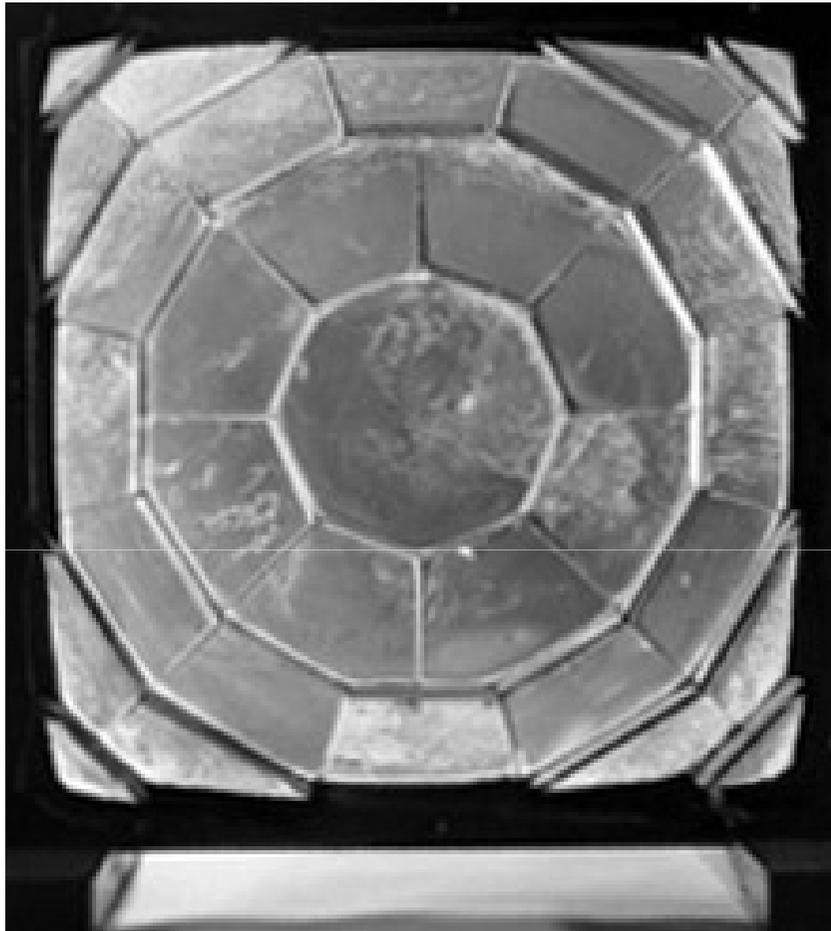
Illustration de « De Catoptica theorematibus » de Jacques Cassini : Theses Mathematicae de Optica, 1691

L'apport de Fresnel concernant les lentilles

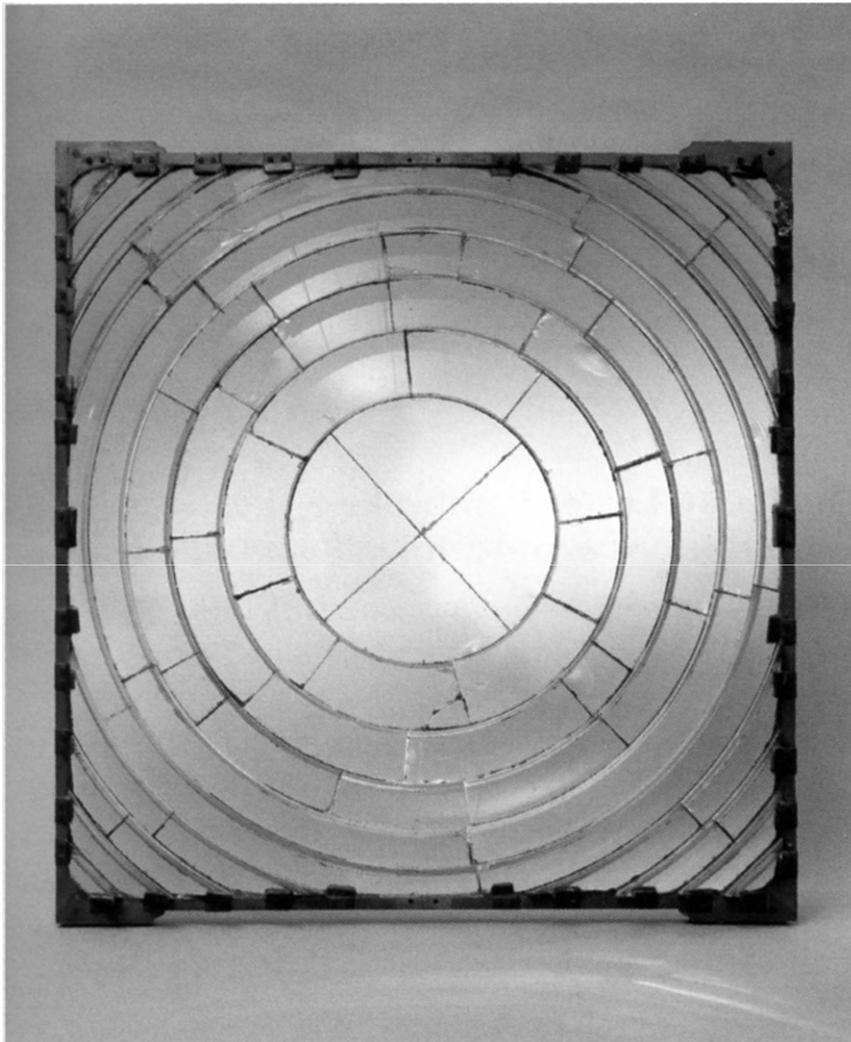
- L'idée de réaliser de grandes lentilles par échelons n'est pas de Fresnel, mais de Buffon,
- Réalisation des lentilles en un certain nombre de fragments (polygones puis à partir de 1823 fragments d'anneaux) concentriques,
- Correction de sphéricité beaucoup plus facile (chaque anneau a un rayon de courbure légèrement différent de celui de ses voisins),
- Choix d'un verre et d'un verrier capable de fournir une ébauche de bonne qualité,
- Choix d'un opticien (Soleil) pour tailler les pièces, les polir et les assembler,
- Amélioration continue des procédés (augmentation de la taille des polygones, changement de leur forme, passage du polissage sphérique au polissage annulaire, remplacement des miroirs par des prismes fonctionnant en réflexion totale) : un travail d'ingénieur !



Lentille à échelons fabriquée par
Fresnel et Soleil en 1819-1820
(actuellement au musée des arts
et métiers)



Lentille à échelons de Fresnel
et Soleil, 1820 (observatoire
de Paris)

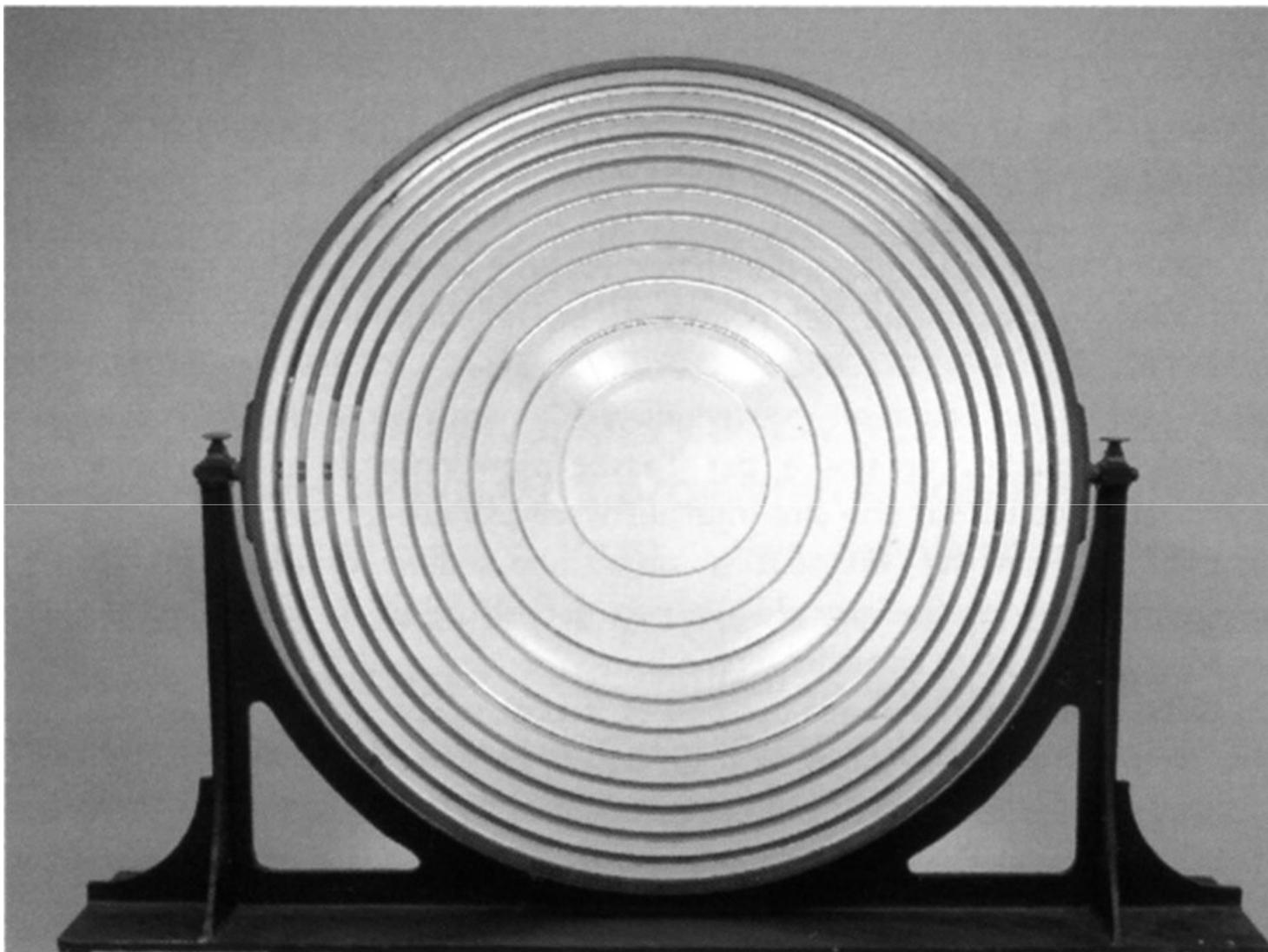


Lentille à échelons de Fresnel et
Soleil de forme circulaire, 1821
(ancien musée des phares)

La première lentille à échelons de forme circulaire pour feux à éclats tournants, créée par Augustin Fresnel et François Soleil en 1821.
MnM, ancien musée du service des phares,
n° d'inventaire 19 PA 43D. © MnM/Arnaud Fux.



Lentille de Fresnel
(collection école
polytechnique)



Lentille ardente fabriquée par la maison Barbier et Fenestre vers 1880.
MnM, ancien musée du service des phares, n° d'inventaire 19 PA 50 D.

© MnM/Arnaud Fux.

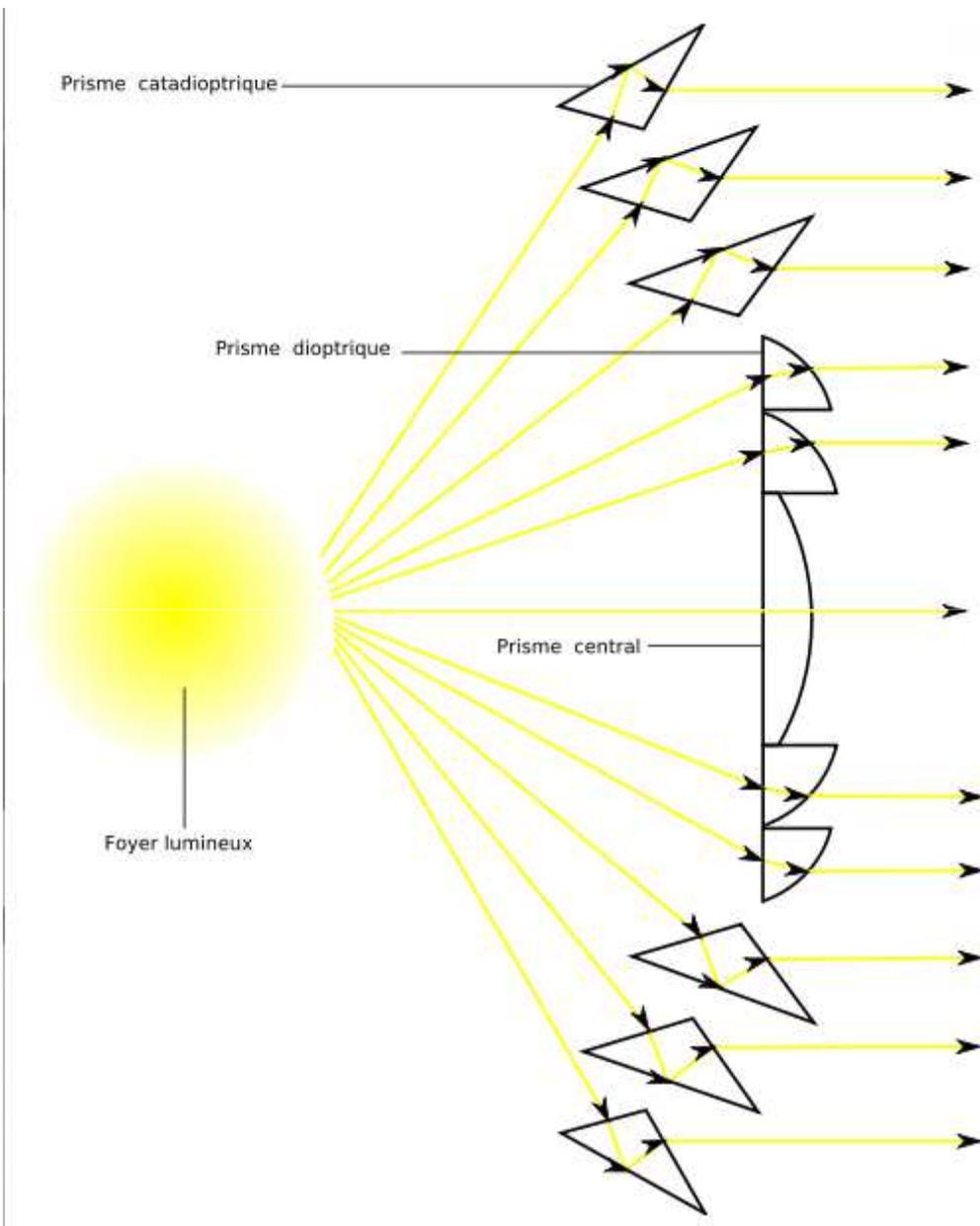


Schéma d'une lentille dioptrique et catadioptrique



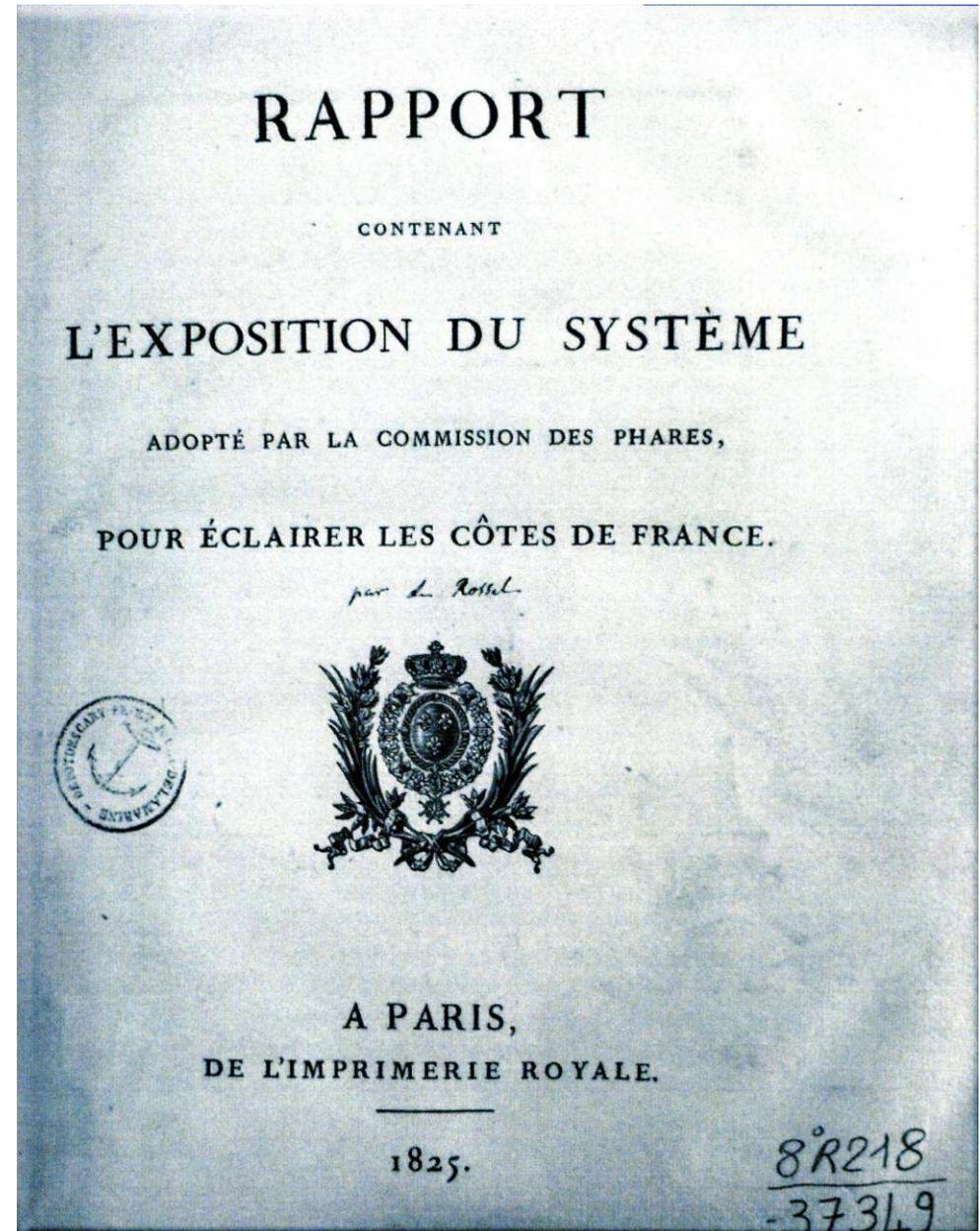
évolution ultime des
lentilles de Fresnel en
1870

Diamètre : 198 cm,
hauteur : 254 cm, poids :
1500 kg

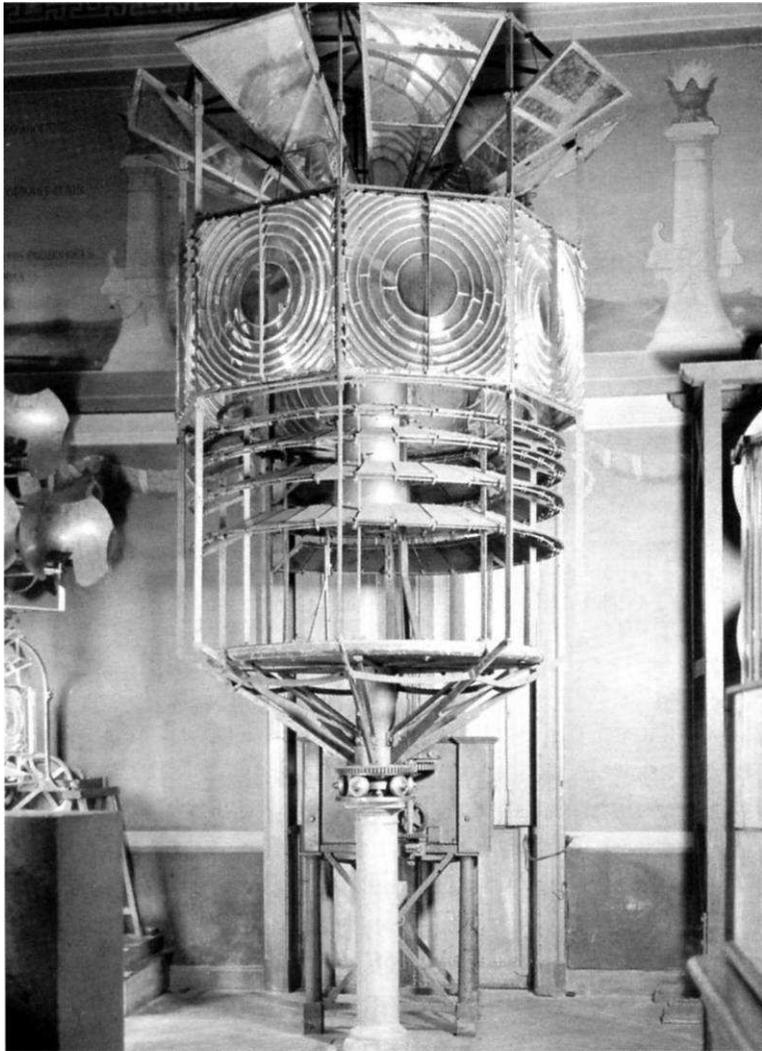
(musée de la Marine)

Premier plan d'équipement des côtes

Fresnel est la
cheville
ouvrière du
premier plan
général
d'équipement
des côtes
françaises (en
1825)



Premiers phares équipés



Première optique de Cordouan (1823) conçue par François Soleil, exposée dans l'ancien Musée des phares du Trocadéro, aujourd'hui disparu.

© Archives phares et balises.

Ils étaient équipés de 4, 8, ou plus, lentilles de Fresnel de section carrée,

Au dessus et en dessous, des réflecteurs métalliques étaient installés.

Les grands phares avaient des lentilles de 76 cm de côté et de 92 cm de focale.

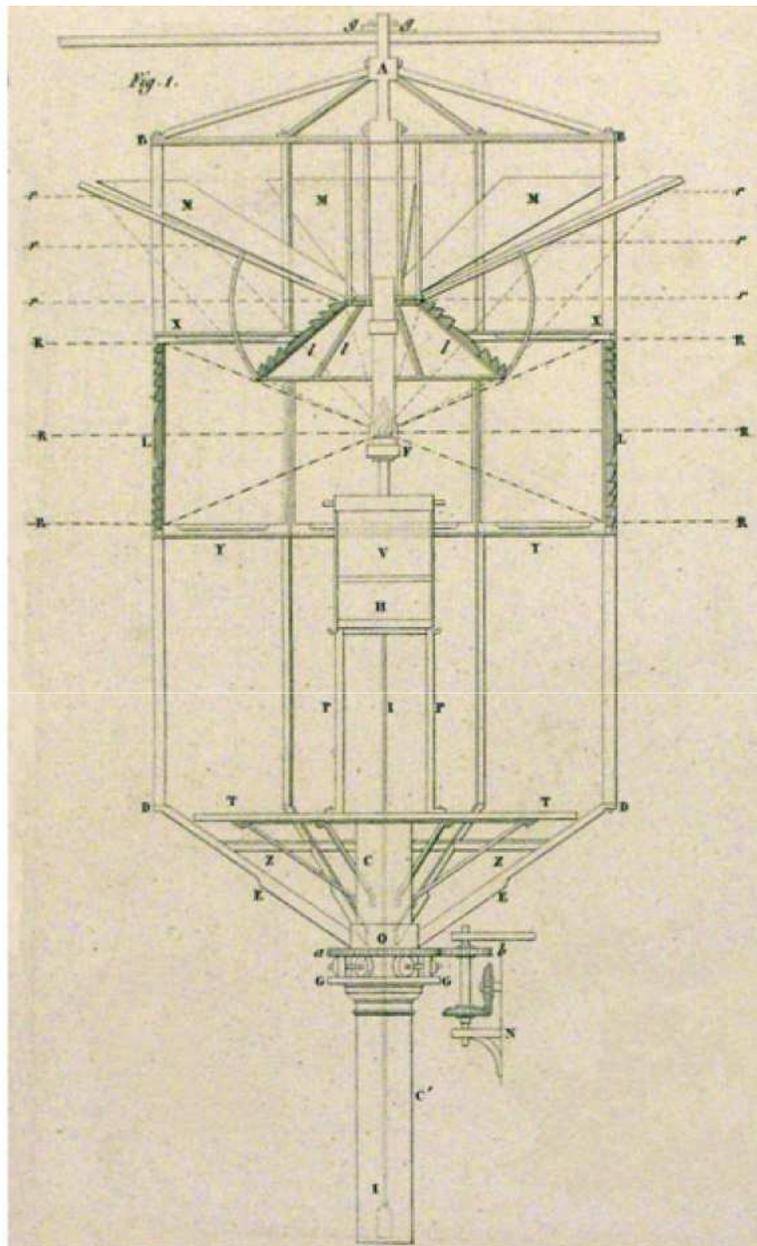
La source lumineuse était une lampe à huile (améliorée par Fresnel).

L'ensemble était animé d'un mouvement de rotation (amélioré par Fresnel).

Le phare de Cordouan



Appareil lenticulaire de Cordouan 1823, conservé au musée des Phares et Balises, à Ouessant
In *Phares, histoire du balisage et de l'éclairage des côtes de France*. Jean-Christophe Fichou, Noël Le Hénaff, Xavier Mével. Douarnenez, Chasse-marée, 2003, p.76
Crédit photo : Musée des Phares et Balises à Ouessant (N. Le Hénaff)



Coupe de l'optique du
phare de Cordouan
(archives de la Gironde)

Fig. 1, coupe verticale de l'appareil lenticulaire, suivant son axe. On a coupé seulement l'armature, les lentilles et les miroirs; la lampe et la colonne sont en élévation.

Fig. 2 .

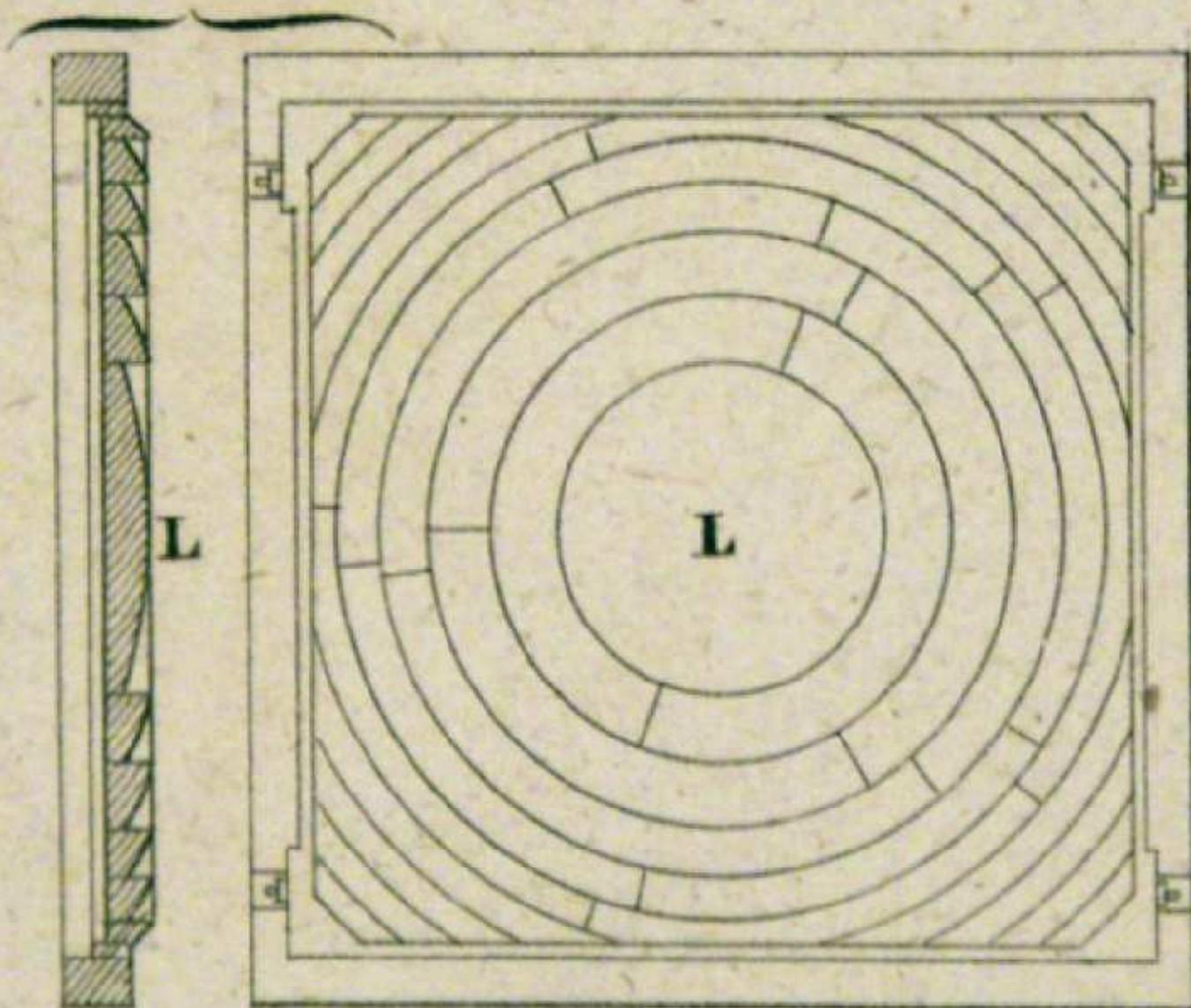


Fig. 2, élévation et coupe de l'une des grandes lentilles annulaires, garnie de son châssis.

Fig. 3 :

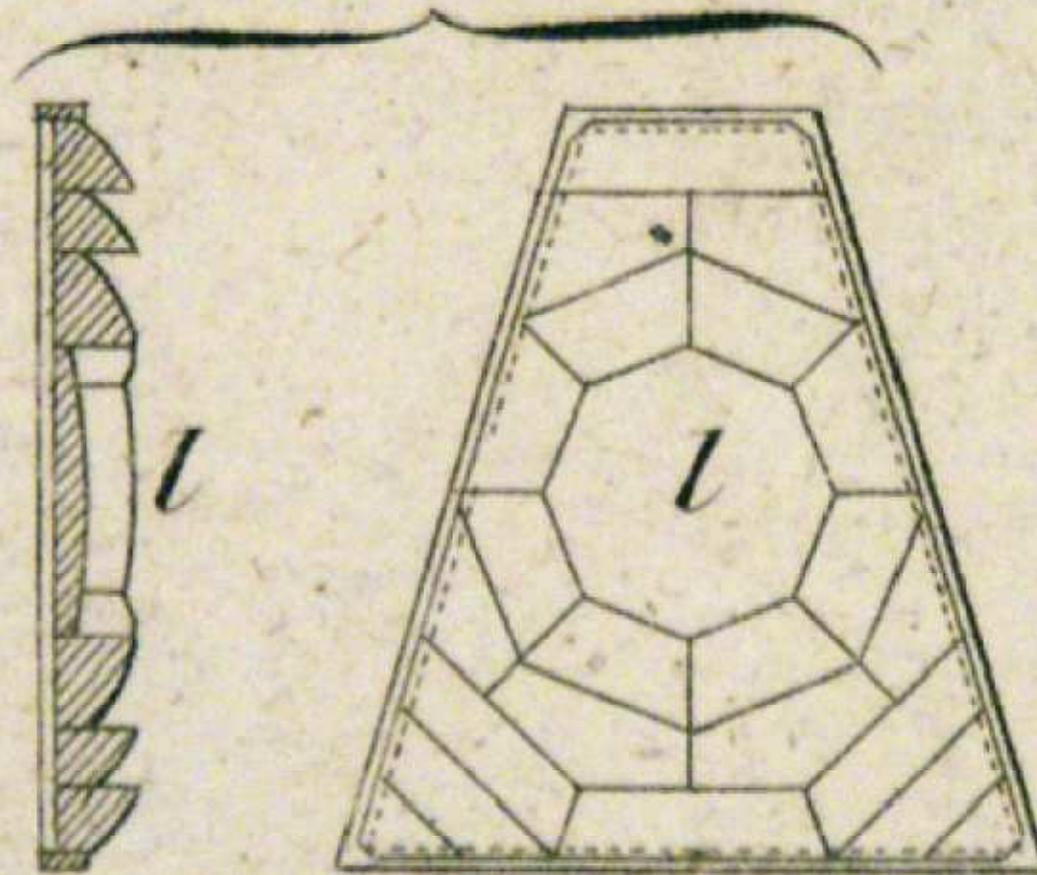
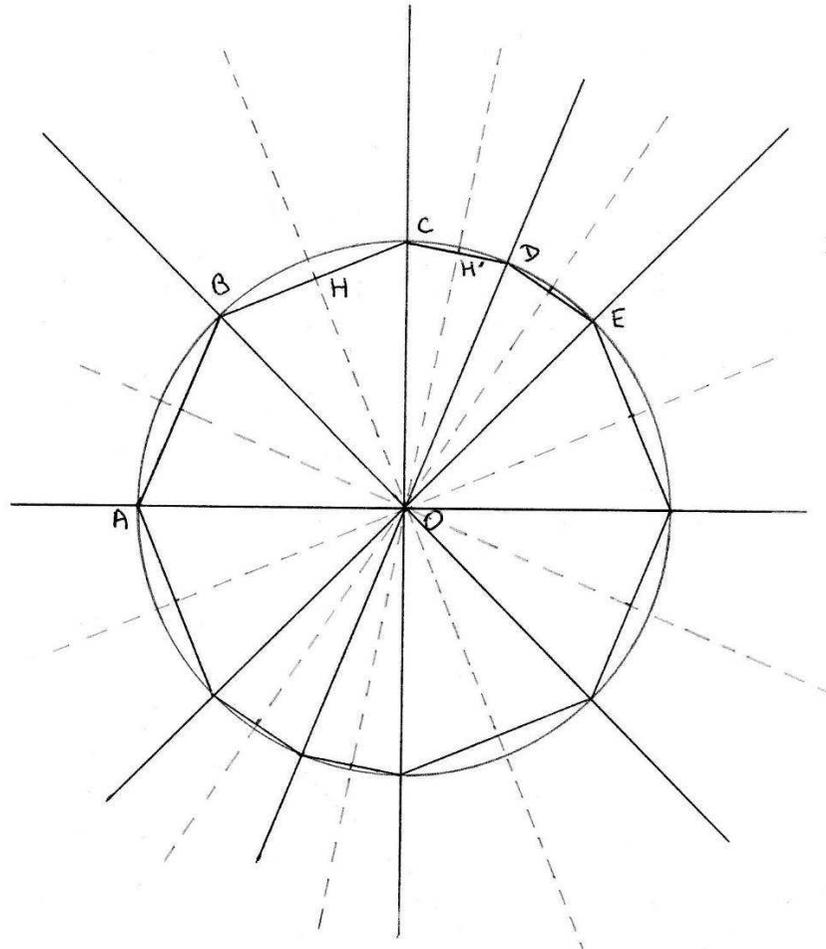


Fig. 3, vue de face et coupe d'une des petites lentilles additionnelles.

Feux à éclats



Séquence : 1, 0.75, 0.5, 0.75, 1, 1, 0.75, 0.5, 0.75, 1...

Le verre utilisé pour les premières lentilles de Fresnel

- Les qualités requises pour le verre sont :
 - Faible absorption lumineuse,
 - Possibilité d'obtenir des pièces de grandes dimensions,
 - Bonne durabilité (par comparaison aux miroirs métalliques),
- L'indice n'est pas critique (le verre au plomb n'est pas indispensable ; Fresnel indique d'ailleurs qu'il serait moins durable et plus lourd),
- La perfection optique du système n'est pas nécessaire : la source lumineuse est loin d'être ponctuelle.

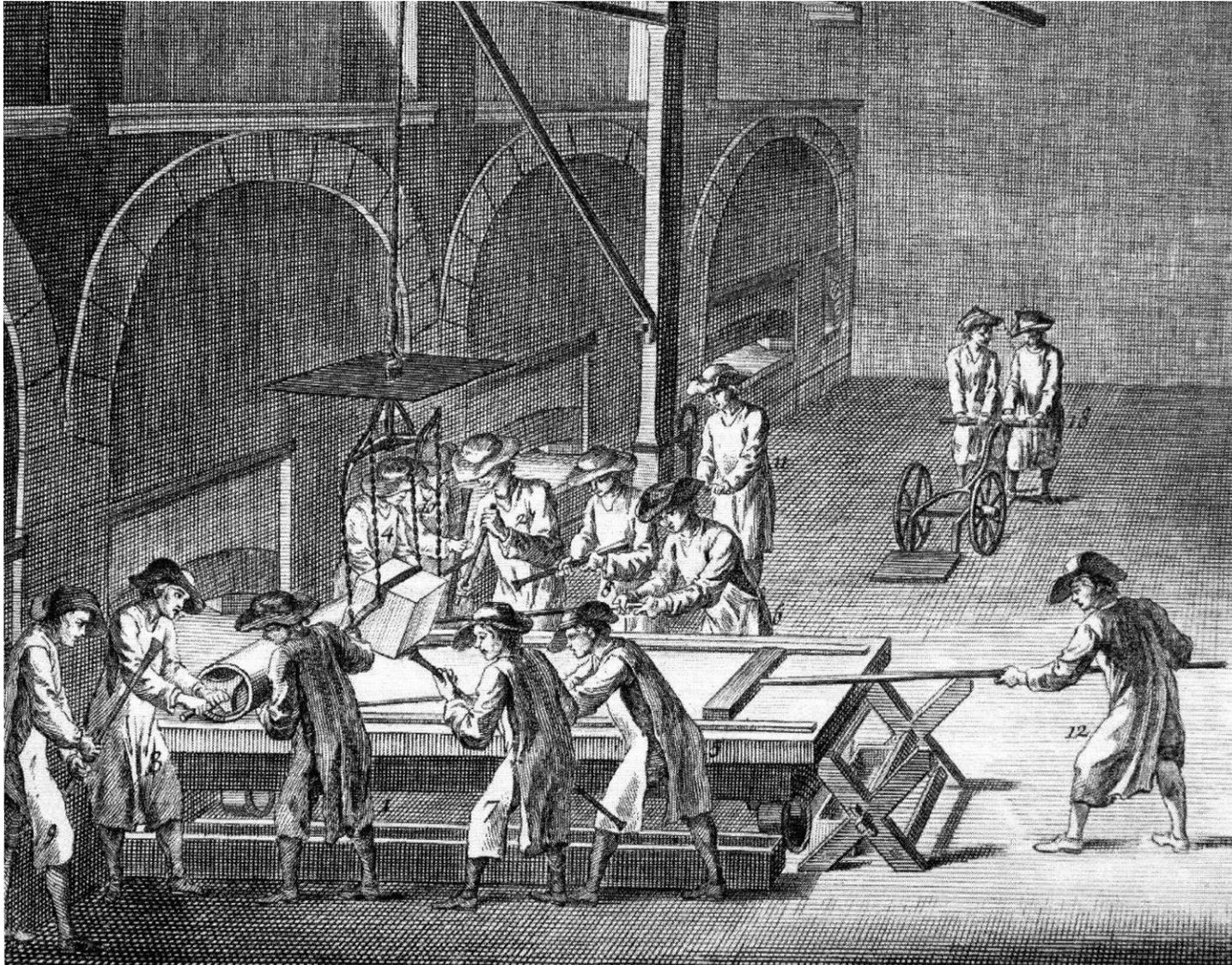
Le verre utilisé pour les premières lentilles de Fresnel

- Pour les premiers prototypes, Soleil mit en forme lui-même le verre « **en refoulant au four les glaces ordinaires sans en altérer la transparence** »,
- Il s'est adressé à la verrerie de Choisy (celle de Georges Bontemps, l'auteur du « Guide du verrier ») pour lui fournir des ébauches, sans succès,
- Fresnel a alors entrepris des négociations avec Saint-Gobain pour réaliser les ébauches pour l'optique du phare de Cordouan : « **le savant directeur de cette manufacture, Mr Tassaert, a mis beaucoup d'intérêt au succès de la fonte de nos prismes courbes** ».

Mise en forme du verre par refoulement

- On ne sait pas exactement à quoi ça correspond,
- Fresnel indique que le verre ainsi obtenu comporte moins de stries et surtout de bulles que le verre coulé en moules,
- Henrivaux, à propos de la fabrication des premières lentilles, parle de « ramollissement » du verre,
- On peut penser que le verre est ramolli dans une sorte de moule dont une paroi, mobile, est progressivement rapprochée de la paroi en vis-à-vis de façon à augmenter l'épaisseur du verre (analogie avec le procédé float pour faire du verre d'épaisseur $> 8\text{mm}$).

Mise en forme du verre par refoulement

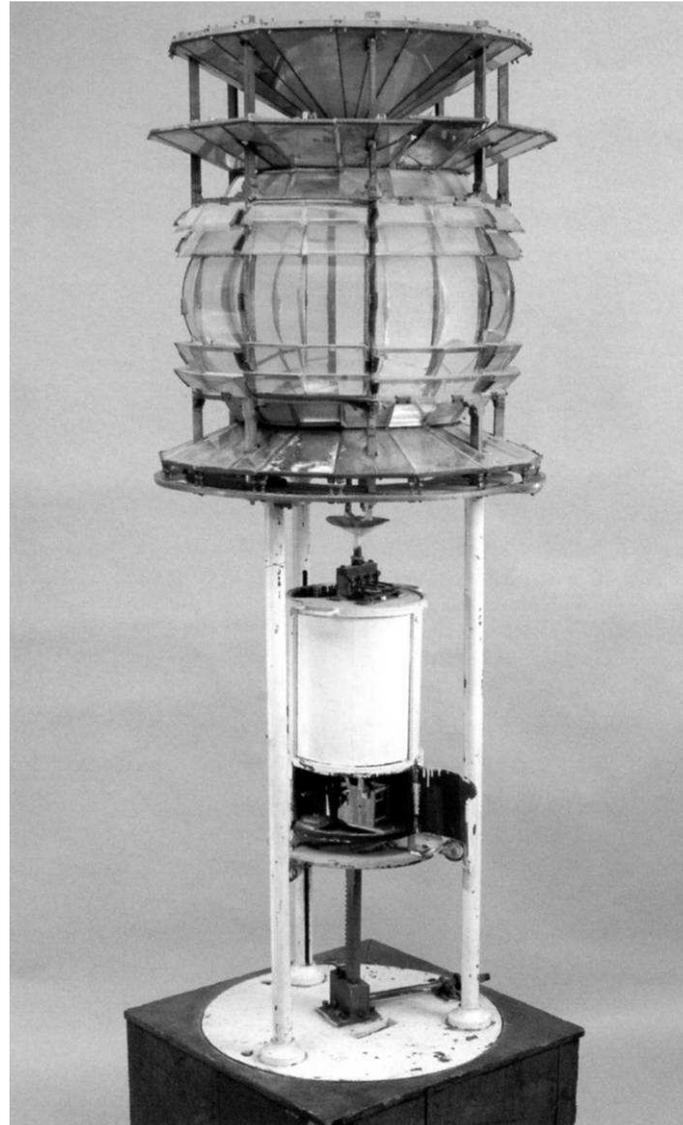


Les lentilles de Fresnel étudiées au C2RMF



Prototype de lentille (1821)

(D. Bagault)



Premier appareil lenticulaire de feu fixe de 0,50 m de diamètre, présenté par Augustin Fresnel à l'Académie des Sciences le 3 mai 1824. Il fut ensuite installé à Dunkerque où il fonctionna de 1825 à 1843 avant d'être ramené à Paris. MnM, ancien musée du service des phares, n° d'inventaire 19 PA 46D.

© MnM/Arnaud Fux.



Feu d'horizon du phare de Dunkerque (1824)

(D. Bagault)

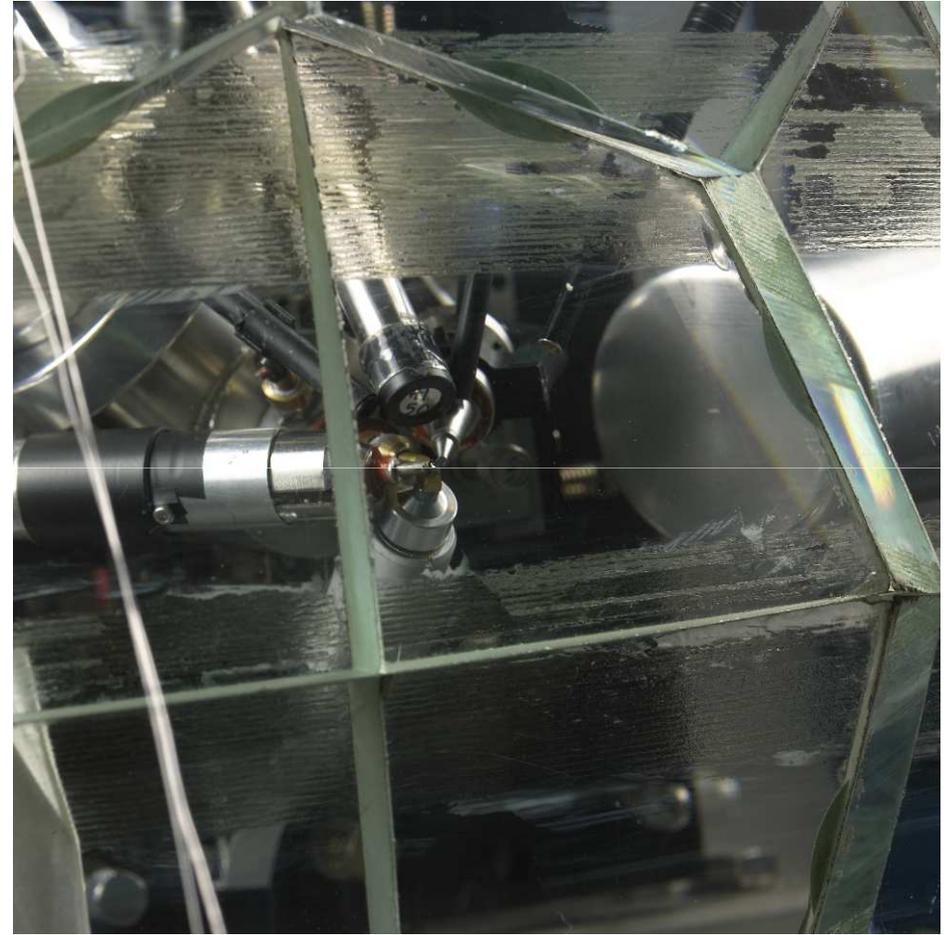
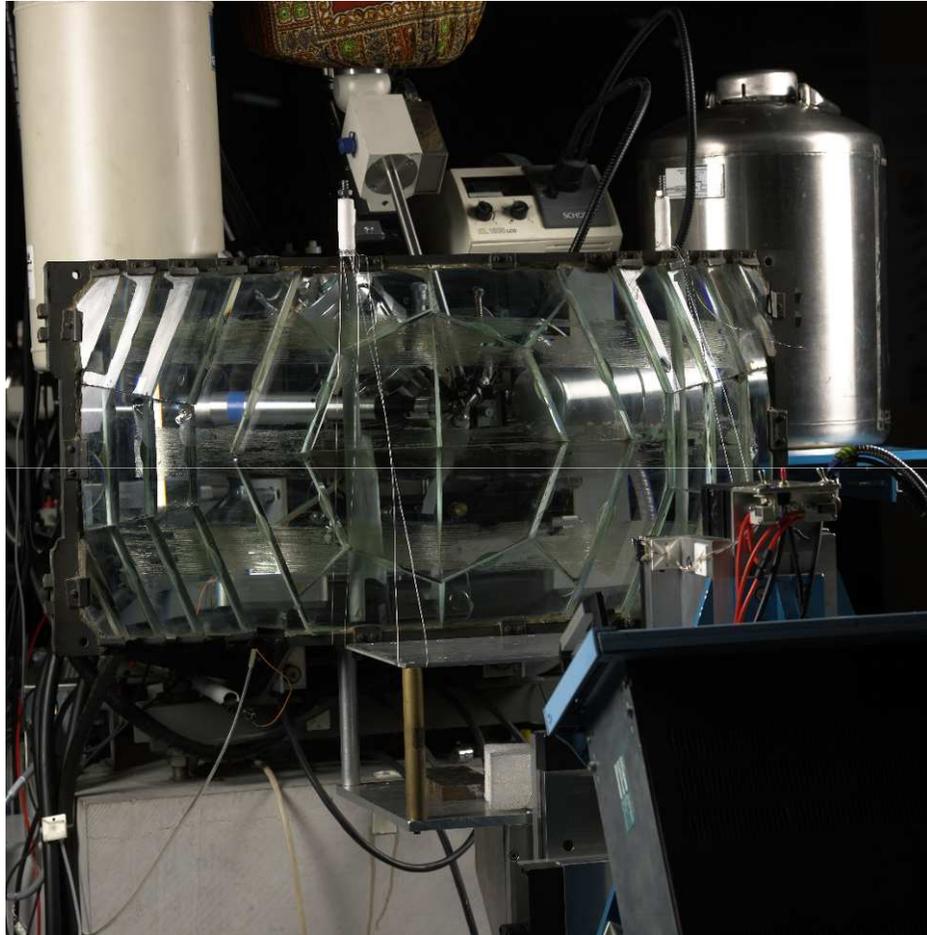
Repères chronologiques

- Une première lentille a été construite en 1820 (testée le **1^{er} mars 1820**),
- Une seconde, de 55 cm de côté et 70 de focale en **mai 1820**,
- Un système de 6 lentilles + 2 x 2 demi-lentilles a été testé le **7 septembre 1821** à l'Arc de Triomphe,
- Les lentilles du phare de Cordouan étant constituées d'anneaux, le prototype est donc antérieur,
- Il est donc probable que le verre a été mis en forme et poli par Soleil,
- Il s'agit certainement de « glace » ordinaire,
- Le feu d'horizon de Dunkerque est postérieur (**1824**, mis en service en 1825) ; il s'agit très certainement de verre coulé par Saint-Gobain.

Travaux réalisés au C2RMF

- Détermination de la composition des verres constituant les deux optiques par la méthode PIXE-PIGE, directement sur les objets, sans prélèvement,
- Détermination de la focale des optiques, par mesure directe de la distance de focalisation d'un rayon laser (pour les deux optiques) et par la mesure du rayon de courbure dans le cas du feu d'horizon.

Analyse du verre sur AGLAE



Composition des verres

zone	Na2O gamma	MgO	Al2O3	SiO2	SO3	Cl	K2O	CaO	Fe2O3
lentille centrale	14.8	0.02	0.80	76.6	0.59	0.70	0.38	5.96	0.056
"	14.8	0.04	0.73	76.7	0.20	0.77	0.49	6.17	0.058
"	14.9	0.03	0.68	76.0	0.83	0.36	0.58	6.42	0.061
"	14.5	0.04	0.70	76.8	0.33	0.83	0.38	6.29	0.056
1er anneau	14.3	0.03	0.76	76.9	0.56	0.62	0.50	6.19	0.059
"	14.2	0.06	0.73	76.2	0.20	1.29	0.38	6.82	0.061
2ème anneau	15.2	0.00	0.71	76.1	0.74	0.63	0.37	6.03	0.053
3ème anneau	15.1	0.03	0.75	75.6	0.32	1.28	0.38	6.40	0.061
"	15.3	0.00	0.74	75.8	0.78	0.30	0.47	6.38	0.084
"	15.1	0.03	0.72	75.9	0.98	0.20	0.59	6.25	0.081
4ème anneau	15.0	0.00	0.75	75.9	0.92	0.12	0.43	6.68	0.091
"	14.8	0.00	0.75	76.4	0.77	0.78	0.41	5.94	0.050
<i>moyenne</i>	<i>14.9</i>	<i>0.02</i>	<i>0.73</i>	<i>76.25</i>	<i>0.60</i>	<i>0.66</i>	<i>0.45</i>	<i>6.29</i>	<i>0.064</i>
1er anneau	15.5	0.05	0.69	75.1	1.16	0.27	0.45	6.60	0.061

Tableau d'analyse PIXE-PIGE, en % en poids

en vert : prototype

en mauve : feu fixe

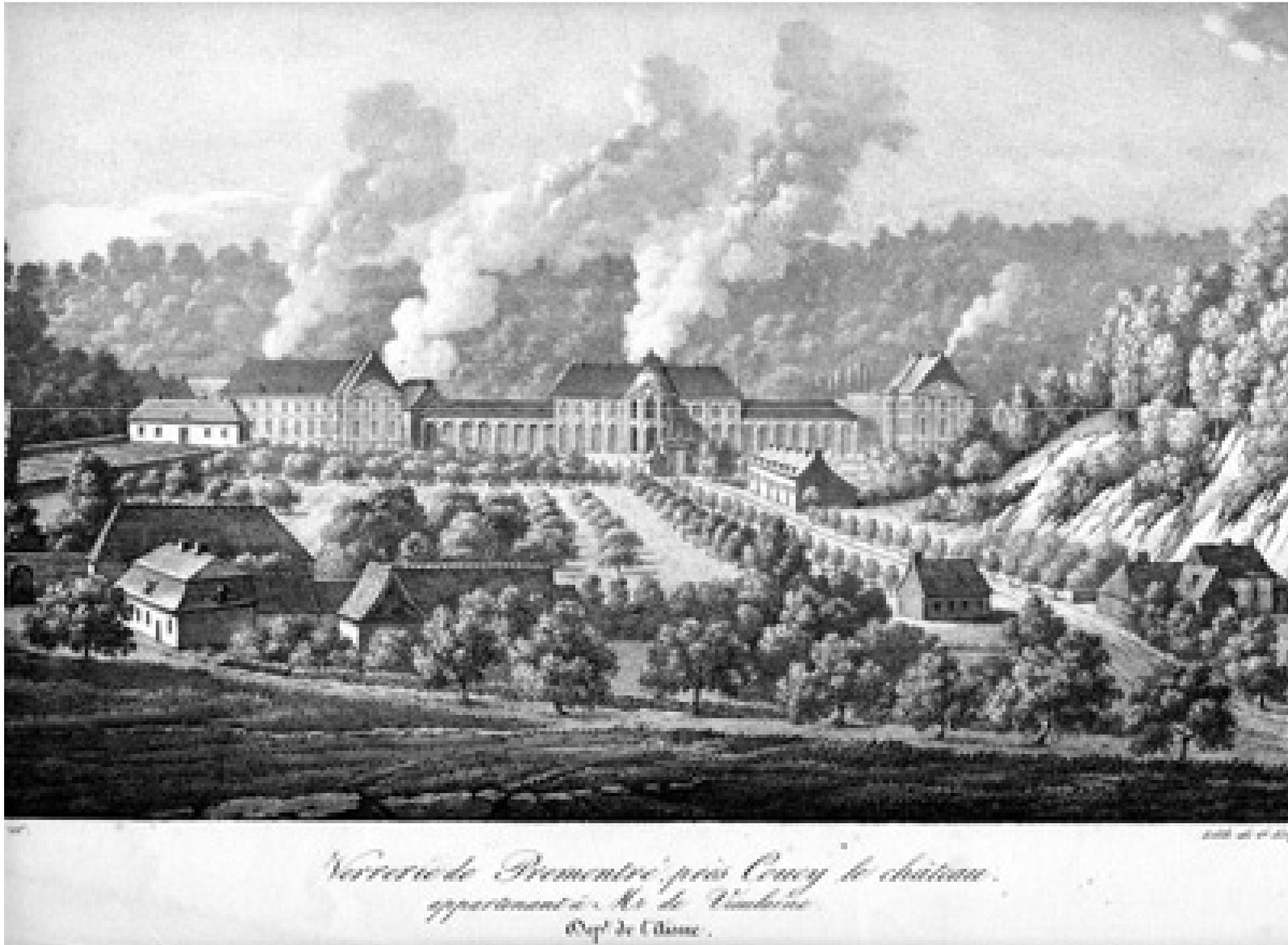
Composition du verre de SG dans les années 1820-1830 :

SiO₂ = 78, Na₂O = 16,3 et CaO = 5,7

Origine du verre

- Les deux verres sont identiques,
- Le verre du feu d'horizon (1824) a été coulé par Saint-Gobain,
- Le verre du prototype de feu à éclats (1821) est antérieur aux négociations entre Fresnel et Saint-Gobain. Il a été fait par « refoulement de la glace ». Les fabricants de « glace » à cette époque étaient Saint-Gobain et Saint-Quirin (depuis 1804). Commentry sera créé en 1824 mais ne commencera sa production qu'en 1826, sensiblement à la même période que la verrerie de Prémontré. Dans les années 1820, Saint-Gobain avait un monopole dans la région parisienne. Il est donc probable que ce prototype ait été fabriqué par Soleil avec du verre à glace de Saint-Gobain. Hypothèse renforcée par le fait que la composition est identique que celle du feu d'horizon.

La verrerie de Prémontré vers 1830

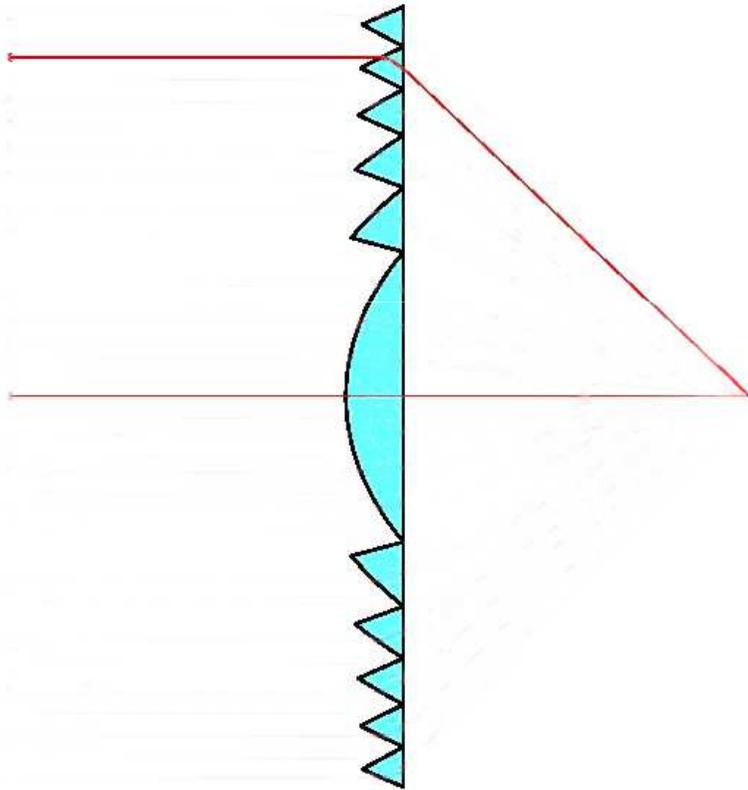


*Verrerie de Prémontré, près Coucy le château.
appartenant à M. de Valenciennes.
Coup de l'usine.*

Corrosion du verre

- La teneur en sodium mesurée par PIGE est très supérieure à celle obtenue par PIXE (plus superficielle) sur les deux verres,
- Ceci montre que le verre s'est appauvri superficiellement en sodium, sur une épaisseur estimée à $1.8 \mu\text{m}$,
- C'est une altération classique. On peut remarquer que la teneur en Cl est très variable d'un point à l'autre (présence de chlore dans la couche corrodée ?),
- On sait par ailleurs que Saint-Gobain a modifié sa composition de verre pour en améliorer la durabilité au milieu du 19^{ème} siècle (augmentation de la teneur en CaO).

Mesure directe de la focale des lentilles

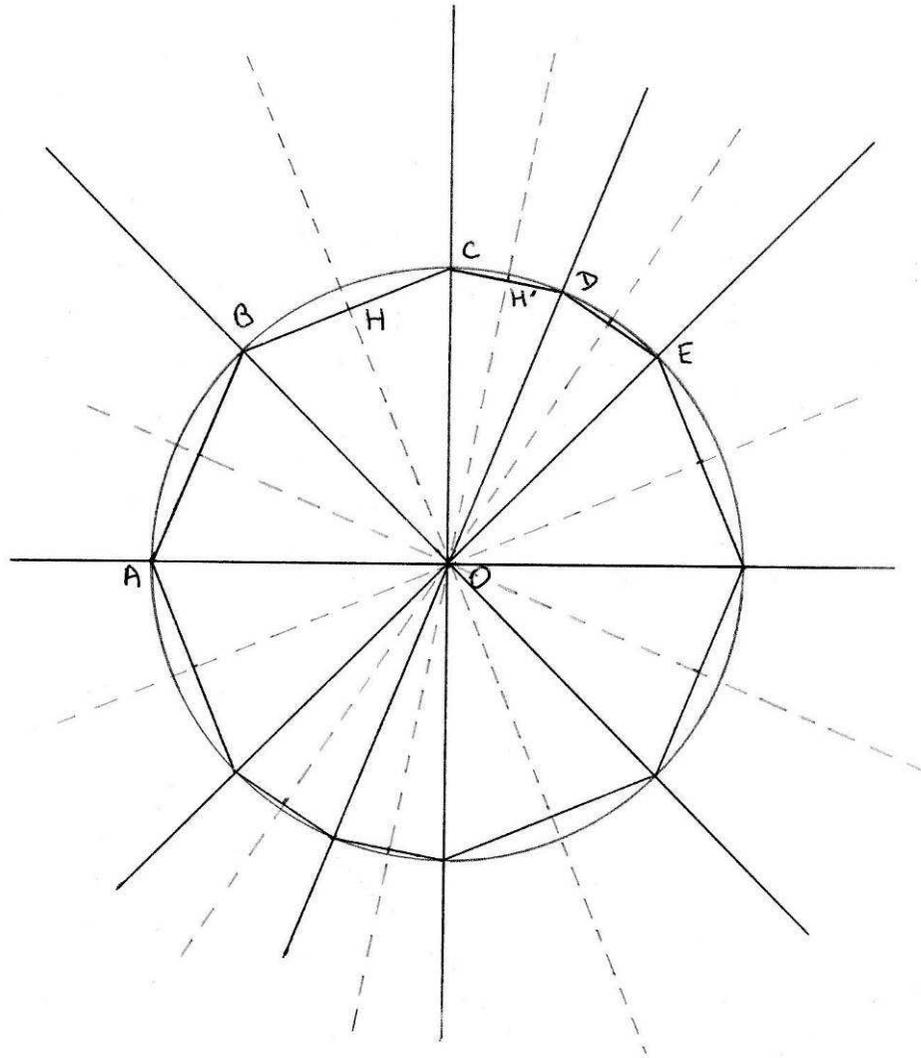


On déplace un laser parallèlement à l'axe optique du système et on repère la position de l'écran pour laquelle l'image ne se déplace pas.

Mesure directe de la focale des lentilles

- Pour le prototype de feu à éclats : $f = 97.2$ cm, un peu plus que les valeurs annoncées pour les lentilles carrées de première catégorie (92 cm).
- Pour le feu d'horizon : 24.5 cm

Montage possible des lentilles



AB et BC = grandes lentilles carrées,

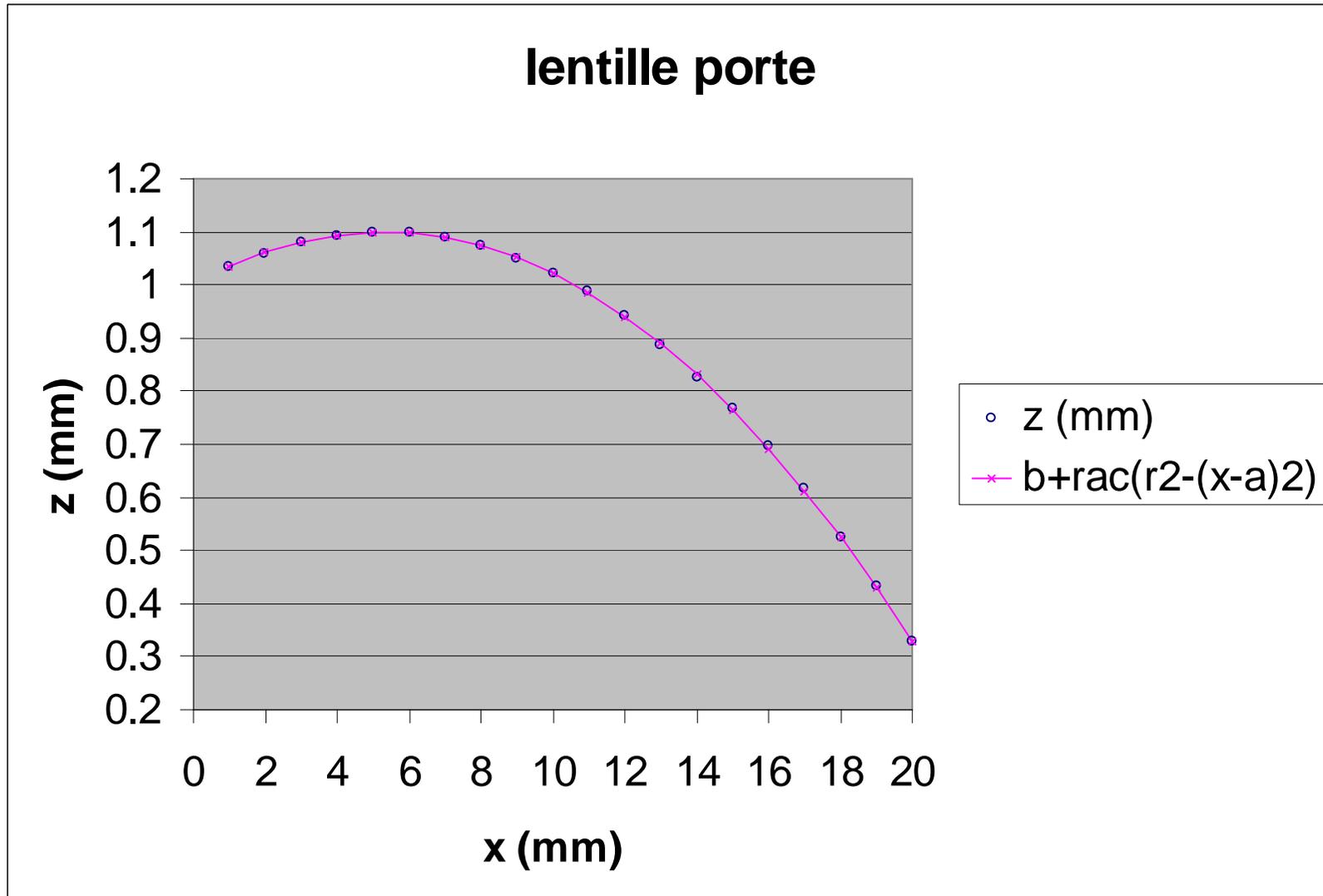
CD et DE = demi-lentilles,

OH = focale des grandes lentilles,

OH' = focale des demi-lentilles.

Si OH vaut 92cm, OH' vaut 97.7cm

Mesure du rayon de courbure de la lentille centrale du feu d'horizon



Mesure du rayon de courbure de la lentille centrale du feu d'horizon

- On trouve un rayon de courbure de 140 mm,
- Ce qui conduit à une focale de 25.7 cm (indice 1.51), mais peut descendre à 25 cm si la mesure n'a pas été réalisée exactement dans l'axe.
- Dans son projet de feu fixe présenté à l'académie, Fresnel donne 50 cm de diamètre intérieur.

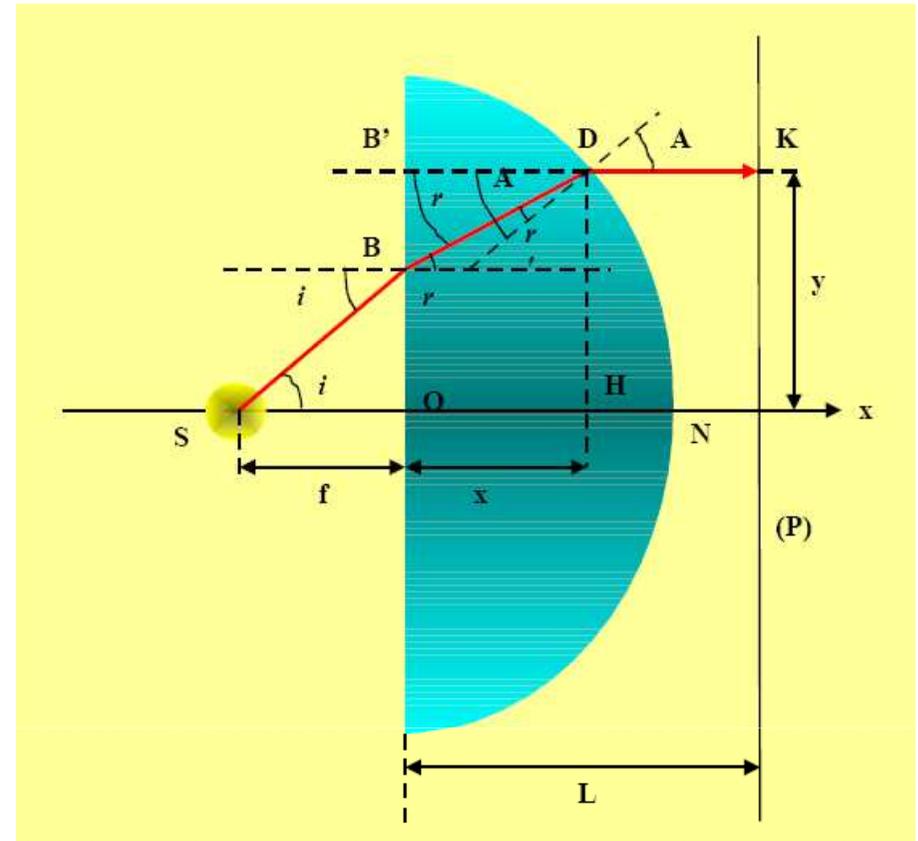
Conclusion

- Les lentilles de Fresnel ont connu un grand succès : on passe, sur les côtes françaises, de 24 phares en 1800 à 58 phares en 1850 et 372 en 1870, et le nombre de naufrages diminue considérablement. Toutefois elles ont mis plus de 20 ans avant de s'imposer en Grande Bretagne.
- Augustin Fresnel, décédé en 1827 (à 39 ans), ne connaîtra pas ce succès. Son frère Léonor le remplacera à la commission des phares et poursuivra son travail,
- Les lentilles à échelons ont valu à Fresnel la médaille d'or à l'exposition industrielle de Paris de 1823 (médaille d'argent à Soleil), et ont contribué à son élection à l'Académie des Sciences en 1823,

Conclusion (suite)

- Les deux lentilles étudiées sont constituées de verre sodo-calcique classique. La composition est similaire à celle de Saint-Gobain de l'époque pour son verre à glace.
- Le verre est lixivié sur une épaisseur estimée à $1.8 \mu\text{m}$, ce qui est beaucoup pour un verre destiné à cet usage, mais normal compte tenu de sa composition riche en alcalins (celle-ci sera changée quelques années plus tard pour améliorer la durabilité).
- Les focales mesurées sont 97 cm (prototype) et 25 cm (feu fixe), valeurs compatibles avec celles que l'on peut estimer d'après la littérature : 2 demi-lentilles prennent la place d'une lentille de 92 cm de focale.

Merci à Claude Guillemet pour ses conseils dans le calcul de la focale à partir du rayon de courbure.



Je vous remercie pour votre attention !