ACCUEIL
Frédéric Elie on ResearchGate

Phare de Contis (Landes, France)
et les lentilles de Fresnel

Frédéric Élie
(août 1996, mars 2006)

« Si vous de dites rien à votre brouillon, votre brouillon ne vous dira rien ! »
Jacques Breuneval, mathématicien, professeur à l'université Aix-Marseille I, 1980

Abstract : La visite du phare de Contis, dans les Landes, a donné l'occasion d'écrire cet article sur les phares, et comme toujours dans ce site, c'est un prétexte pour faire un peu de physique, plus particulièrement de l'optique: on verra comment et pourquoi les lentilles de Fresnel qui équipent le sommet des phares sont utilisés, et pourquoi les phares n'ont pas une altitude quelconque...

SOMMAIRE

Le phare de Contis

1 - Contis-Plage et son phare

A quelques 13 kilomètres au sud de Mimizan, dans le département des Landes, se trouve Contis-Plage (commune de Saint-Julien en Born), entourée de sa forêt de pins que domine le phare de Contis du haut de ses 50 mètres.
Mis en service en 1863 ce phare important de la côte atlantique française a subi plusieurs transformations et même connu une histoire agitée. La carte ci-dessous renseigne sur sa localisation. Ses coordonnées et données officielles sont les suivantes :
- phare enregistré à l'Etablissement de Signalisation Maritime sous le numéro : 1254/000
- latitude nord : 44°05,045' ; longitude ouest : 01°19,010'
- coordonnées en système Lambert III cartographique: X = 307,270 ; Y = 1905,900 ; Z = 10

Caractéristiques nautiques et maritimes du phare de Contis :
- en feu normal :
  - couleur du feu : blanc
  - éclairage : lampe halogène de 180 W sous 24 V (qui a remplacé une ampoule de 1500 W installée en 1951), optique constituée d'une lentille de Fresnel (voir annexe 2)
  - rotation du système optique sur une cuve à mercure, entraînée par deux moteurs en courant continu de 15 W alimentés sous 24 V
  - système optique constitué de 4 panneaux de distance focale 30 cm
  - groupe électrogène de secours, démarrant à la moindre coupure du réseau électrique public
  - rythme des éclats : 3 alternances d'éclats de 0,1 s et d'obscurité de 4,1 s, puis un éclat de 0,1 s et une obscurité de 12,3 s, soit une durée de cycle de 25 s (l'ensemble optique fait un tour en 25 s)

- portée : 23 milles marins (42 km)
- intensité lumineuse : 300000 cd

- en feu de secours :
  - couleur du feu : blanc
  - éclairage : lampe halogène de 40 W sous 12 V
  - rotation du système optique sur roulement à billes, entraînée par un moteur synchrone de puissance 6 W alimenté sous 12 V délivrés par une batterie
  - système optique constitué de 4 panneaux de distance focale 10 cm
  - rythme des éclats : identique à celui de l'éclairage normal
  - portée : 14,5 milles marins (26 km)
  - intensité lumineuse : 13000 cd.

Caractéristiques géométriques :
- le phare a été établi sur une dune de sable arasée culminant à 11,60 m au-dessus du niveau des hautes mers
- sur cette dune l'édifice (la tour proprement dite) a une hauteur de 41,60 m
- la tour supporte le système optique dont le plan focal est situé à 49,60 m au-dessus du niveau des hautes mers

vue sud du phare de Contis : la hauteur totale du phare par rapport au sol est de 41,50 m. La bande noire spiralée qui entoure l'édifice a été imaginée par le peintre Bellocq dit « Menoune » en 1937

vue de Contis-plage depuis la coupole : le centre optique culmine à 49,60 m au-dessus de la mer – A l'intérieur, escalier de fonte de 178 marches

2 - Rôles du phare

Comme la plupart des phares côtiers fixes, le phare de Contis remplit trois missions :
- servir d'amer pour permettre de faire le point en navigation côtière
- servir de feu d'atterrissage
- servir de relais de transmissions radioélectriques, notamment VHF.

2-1 - Notion de point en navigation côtière

En navigation, faire le point c'est porter sur une carte la position du navire et évaluer l'écart entre cette position et la route prévue, et repérer la position relative des dangers mentionnés sur la carte.

Il y a trois familles de méthodes pour faire le point :
- utiliser les repères terrestres : c'est la navigation géodésique
- utiliser les repères célestes : c'est la navigation astronomique
- utiliser la navigation par satellites : GPS, GALILEO notamment

Ce qui nous intéresse ici, faire le point en navigation côtière à l'aide d'un amer que constitue par exemple un phare, fait partie de la première famille, et permet de comprendre l'un des rôles du phare.

Les amers sont des point géodésiques fixes, facilement identifiables et reconnaissables, sur la côte et représentés sur les cartes.

On admet que la propagation optique entre l'amer et le navire se fait selon une ligne droite entièrement contenue dans le plan vertical contenant l'amer et le navire. On appelle ***orthodromie*** la ligne d'intersection entre ce plan et la surface moyenne terrestre (ellipsoïde terrestre). Comme l'observation en navigation côtière met en jeu de faibles distances (une trentaine de milles nautiques), on pourra confondre l'orthodromie avec la loxodromie, c'est-à-dire la droite d'égal azimut représentée sur la carte marine (en ***projection Mercator*** notamment).

Un point sur la carte est obtenu par intersection de lieux mesurés en visuel. Il existe plusieurs techniques pour recueillir les lieux :

- par relèvement visuel d'un amer : on distingue les relèvements simultanés et les relèvements successifs
- par alignement de deux amers
- par obtention d'une ligne de sonde
- par cercle de distance
- par arc capable (peu utilisé)

On ne présentera de manière succincte que les cas du relèvement, de l'alignement et du cercle de distance, méthodes visuelles encore employées et utiles.

Point par relèvements :

Le relèvement d'un amer est, par définition, son azimut compté à partir du Nord vrai au moyen d'un alidade. L'azimut est compté de 0° (Nord vrai) à 359°. Le relèvement vrai (ramené au Nord vrai) se déduit du relèvement donné par le compas, ou relèvement compas, par la relation :

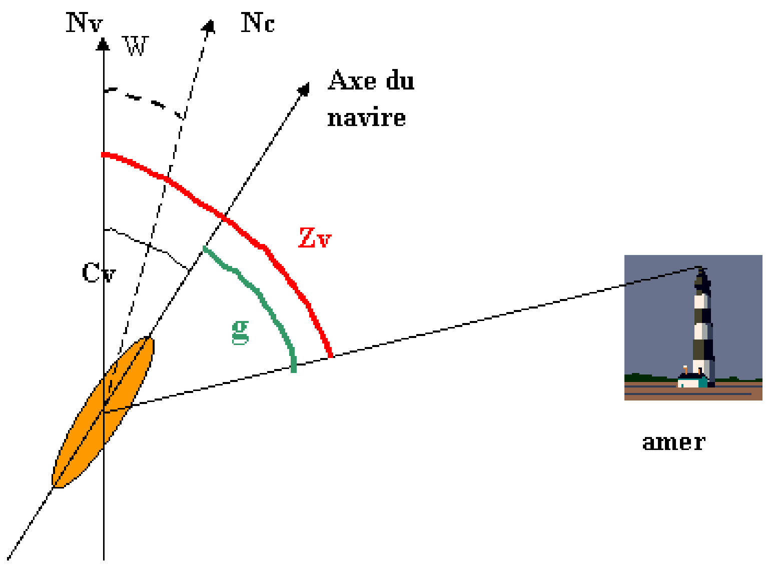
$$Zv = Zc + W$$

où W est la « variation du compas », c'est-à-dire l'erreur introduite par le compas et qui dépend de la latitude du lieu.
On peut aussi obtenir le relèvement à partir de la mesure du gisement de l'amer par rapport au cap du navire :

$$Zv = Cv + g$$

où g est le gisement, c'est-à-dire l'angle entre le cap vrai du navire et l'amer (compté de 0 à 180° par tribord), Cv est le cap vrai, déduit du cap compas Cc par la relation :

$$Cc = Cv + W$$



principe du relèvement

Exemple : si on relève un amer au 89 compas, connaissant la variation de celui-ci égale à -2°, le relèvement vrai est

$$Zv = Zc + W = 89° + (-2°) = 87°$$

Par la méthode du relèvement simultané, on procède aux relèvements de deux amers différents au même moment. Le point est alors obtenu par l'intersection des segments passant par ses amers et faisant les angles Zv mesurés avec le nord vrai. Pour que la méthode soit la moins imprécise possible on doit choisir les amers de telle sorte que leurs écarts angulaires ne dépasse pas 30°.
Par la méthode des relèvements successifs, on relève le même amer à des intervalles de temps égaux alors que le navire suit une route fixe (qui n'est pas le cap !) à vitesse constante (la vitesse étant la « vitesse fond », c'est-à-dire ramenée au fond).

Point par alignement :

La droite passant par deux amers connus A et B de la carte est appelée un alignement. Si du navire on voit ces deux amers alignés alors le navire est sur la même loxodromie sur la carte.
L'alignement est la méthode de navigation visuelle la plus sure parce qu'elle est indépendante des problèmes liés aux appareils de mesure et de la plateforme. Son utilité est avérée pour :
- suivre un chemin dans un chenal pour raison de sécurité
- préparer un point préalablement à un changement de route
- contrôler le point de mouillage par plusieurs alignements
- déterminer la variation du compas W en comparant la mesure du relèvement vrai Zv sur la carte et le relèvement compas Zc : W = Zv – Zc.

La précision de la méthode dépend de la proximité relative des deux amers par rapport à la distance séparant le navire M à l'amer le plus proche. L'erreur commise est d'autant plus élevée que la distance AB entre les amers est insuffisante par rapport à MA. On démontre que la précision est bonne si :

$$MA < 3\,AB$$

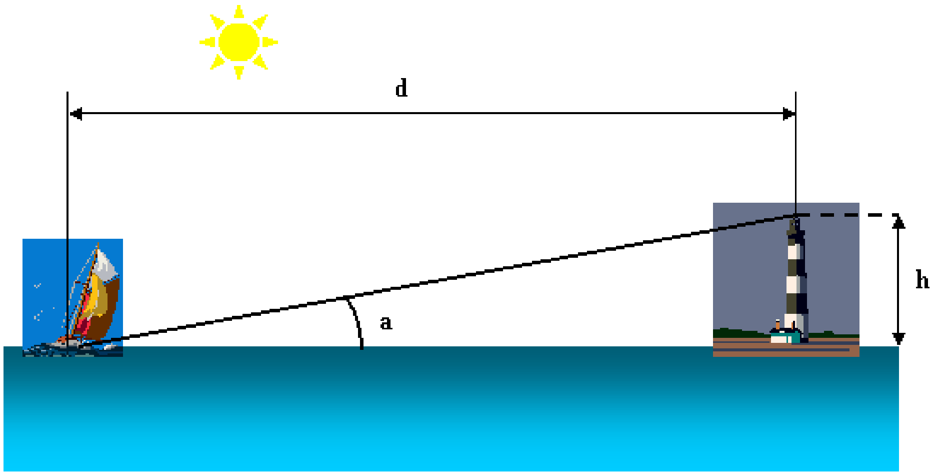
Point par cercle de distance :

Lorsqu'on mesure la hauteur angulaire d'un amer de hauteur métrique connue on peut déduire la distance du navire à cet amer. Il est alors possible de déterminer le point à partir :
- soit d'une ou plusieurs autres mesures de distances avec des amers différents : le navire se

trouve à l'intersection des cercles dont les rayons sont égaux à ces distances et centrés sur les amers respectifs,
- soit en combinant avec un ou plusieurs relèvements ou alignements.

Voici comment procéder :
On mesure à l'aide du sextant la hauteur angulaire « a » d'un amer dont la hauteur métrique « h » est connue. Ces grandeurs sont alors reliées à la distance « d » séparant l'observateur et l'amer par :

$$\tan a = \frac{h}{d}$$

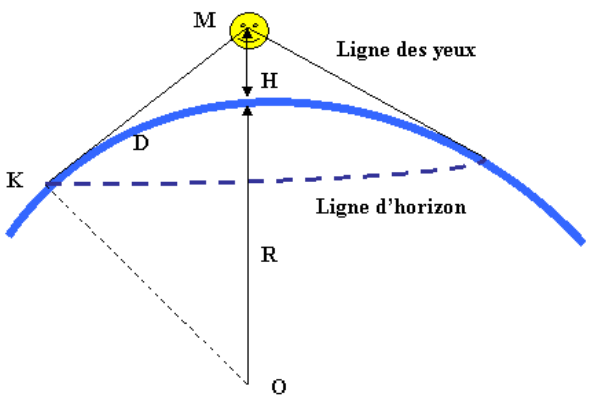


principe de mesure d'une distance par moyen visuel

Pour des hauteurs angulaires faibles, la tangente peut être assimilée à l'angle (si celui-ci est exprimé en radians), et l'on montre facilement (exercice !) que si la hauteur angulaire est donnée en minutes et la distance en milles (1 mille marin = 1852 m), la relation précédente donne :

$$d = 1{,}856 \times \frac{h}{a}$$ (d en milles nautiques, h en mètres, a en minutes d'angle)

Les relations précédentes sont valables uniquement si l'observateur est à une altitude nulle par rapport au niveau de la mer. Cela revient à admettre que la surface de l'eau entre lui et l'amer observé est plane, car non affectée par la courbure de la Terre, donc que la distance n'est pas très importante.
Dans le cas contraire, si l'observateur est à une hauteur H au-dessus du niveau de l'eau (sur une vigie, ou à la passerelle de navigation d'un gros navire, etc.), et si l'amer observé est éloigné, alors il faut tenir compte du fait que la Terre est ronde. L'horizon est le lieu des points où la ligne des yeux de l'observateur est tangente à la surface de la Terre. Il décrit une calotte circulaire centrée en l'observateur (voir figure ci-après).



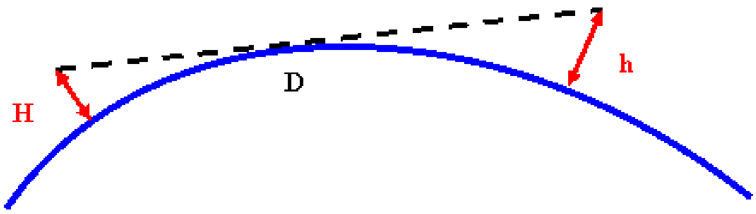
On montre que la ***distance de l'horizon*** D pour un observateur à l'altitude H est donnée par la formule approchée :

$$D = 2{,}1\sqrt{H} \quad \text{(D en milles marins, H en mètres)}$$

Cette formule peut se retrouver facilement par un calcul trigonométrique élémentaire (voir annexe 1), et tient compte de la réfraction atmosphérique. La distance D y représente la longueur de l'arc KM entre l'horizon K et l'observateur M, différente de la longueur du segment KM tangent en K à la surface terrestre, quoique peu différente.

On en déduit qu'un objet élevé de hauteur h, comme un amer, situé au-delà de l'horizon de l'observateur, apparaîtra à celui-ci à une distance D telle que (voir figure) :

$$D = 2{,}1\left(\sqrt{H} + \sqrt{h}\right) \quad \text{(D en milles marins, H et h en mètres)}$$



Cette situation explique pourquoi un bâtiment, ou une montagne, ou la voile d'un vaisseau à l'époque de la marine à voiles, apparaissent soudainement à l'horizon. C'était même une raison qui faisait penser aux Anciens que la Terre était ronde !
Prenons l'exemple du phare de Contis : on sait que de nuit sa portée lumineuse est D = 23 milles, sa hauteur h de l'ordre de 50 m. La lumière de ce phare sera alors visible de nuit à la distance maximale depuis un observateur situé à une hauteur H = 20 m, soit l'équivalent de 7 étages.

2-2 - Feux d'atterrissage

Pour aider de nuit le navigateur à se rapprocher de la côte et à accoster différentes sources lumineuses sont utilisables : balises flottantes, bateaux-feux, bouées lumineuses, balises fixes (telles les phares).
Les feux sont caractérisés par :
- la couleur : elle peut être blanche (B), rouge (R), verte (V), jaune (J)
- le rythme : nombre d'éclats ou d'occultations dans une période, et durée de cette période (en secondes)
- la portée (en milles nautiques) et l'élévation du feu.

Un feu est à éclats lorsque la durée de la lumière est plus courte que celle de l'obscurité. A l'inverse, un feu est à occultations lorsque la durée de la lumière est plus grande que celle de l'obscurité. Il est isophase lorsque ces deux durées sont égales. Il est fixe lorsque la lumière est continue.
Sur les cartes marines les caractéristiques des feux sont mentionnées comme suit :
- *Scint rap* : scintillant rapide. Feu à scintillement continu et rapide, de 120 éclats par minute en général.
- *Scint* : scintillant. Feu à scintillement continu et rapide, de 60 éclats par minute en général.
- *E* : à éclats. Feu à éclats brefs de 0,7 s maximum.
- *EL* : à éclats longs. Feux clignotants avec des éclats de 2 s au moins mais plus courts que la période d'obscurité.
- *Iso* : isophase

- *Occ* : à occultations simples.
- *Fi* : fixe
- *Mo* : code Morse. Balise émetteur de signal en code Morse.
- *Alt* : alternatif. Feux émettant des couleurs alternatives dans un même secteur.

Toutes ces caractéristiques sont regroupées dans la séquence suivante pour un feu :

[type][nombre d'éclats][couleur][période][portée]

Par exemple pour le phare de Contis on a :

E (4) B 25s 23M

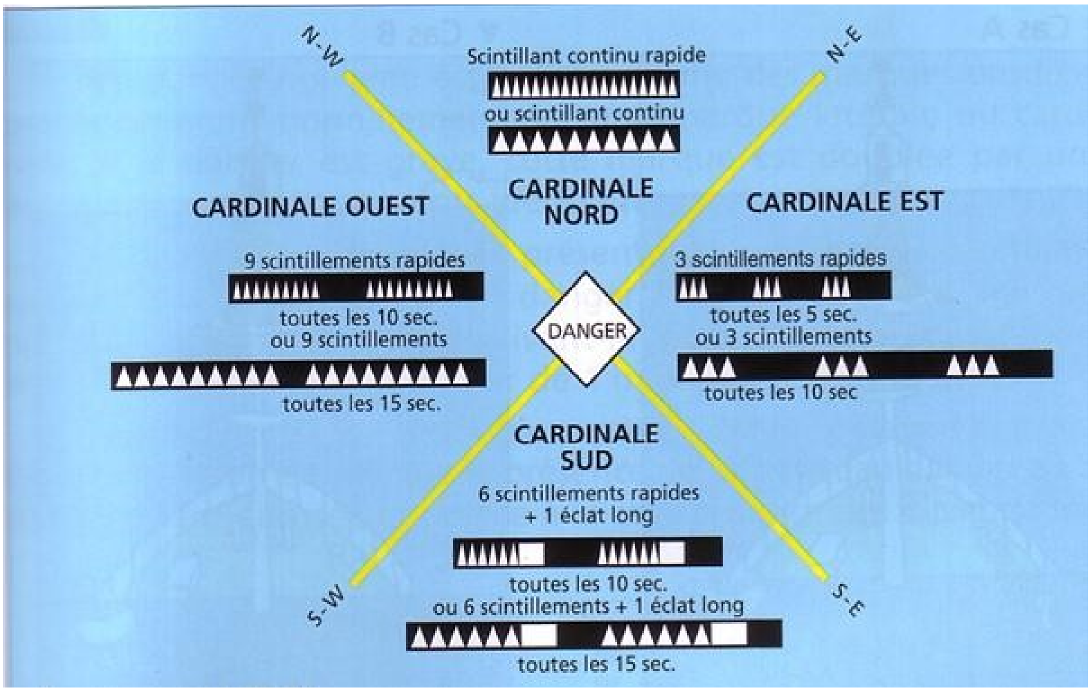
← **4,1 s** → ← **12,1 s** →

Les feux ont pour rôle de mentionner les types de danger ou d'aide à la navigation suivants :
- marques latérales des côtés babord et tribord des chenaux
- marques latérales du chenal préféré
- marques d'eaux saines
- marques signalant des zones ou activités particulières
- marques de danger isolé
- marques cardinales signalant la position d'un danger par rapport à un point cardinal.

La signalétique de ces feux n'est pas la même suivant les régions maritimes considérées A ou B. Ces régions sont définies par l'Association Internationale de Signalisation Maritime (AISM). La région A inclut a France métropolitaine, l'île de la Réunion, la Nouvelle Calédonie, la Polynésie. La région B inclut l'Amérique, les Antilles, Saint-Pierre et Miquelon, la Guyane.

Pour la région A, les principales marques des feux sont :

- Marques latérales (en venant du large vers le port): vert pour tribord, rouge pour bâbord, clignotants, toutes de rythme quelconque autre que celui du chenal préféré.
- Marques de chenal préféré, indiquent le chenal à prendre à une bifurcation de chenaux (en venant du large vers le port): vert pour tribord, rouge pour bâbord, rythme des éclats 2 + 1 (2 éclats rapprochés suivis d'un éclat isolé).
- Marques d'eaux saines, indiquent l'absence de danger : couleur blanche (B), type à occultations ou bien à éclat long toutes les 10 s, ou bien code Morse lettre « A » (• —)
- Marques spéciales (zones ou activités particulières) : couleur jaune, rythme quelconque mais différent de celui de tout feu blanc
- Marques de danger isolé : couleur blanche, rythme de 2 éclats groupés
- Marques cardinales : les feux sont toujours blancs, pour leurs rythmes voir ci-dessous (d'après le code Vagnon de la mer)



Pour plus de détails sur les feux maritimes, consulter le Livre des Feux du SHOM.

2-3 - Relais de transmissions radioélectriques

Le phare de Contis, comme la plupart des phares, a servi aussi de relais de transmissions radioélectriques pour l'aide à la navigation.
Le premier système à avoir été installé est celui de radionavigation (RANA) pour la côte atlantique, en 1987 (portées 370 km de nuit, 740 km de jour).
Puis ce dispositif a été retiré en juillet 1999 suite à l'emploi du DGPS et LORAN C. Depuis seuls existent un dispositif de relais ASN (appel sélectif numérique) VHF du CROSS Atlantique d'Etel, ainsi qu'une station de téléphonie mobile.

Annexe 1: Distance d'horizon

Reportons-nous à la figure correspondante du texte. Le triangle MOK est rectangle en K puisque MK y est tangent à la Terre. Comme OK = R et OM = R+H, le théorème de Pythagore donne :

$$OM^2 = OK^2 + KM^2 = (R+H)^2 = R^2 + OK^2$$

D'où :

$$OK=\sqrt{H(H+2R)}$$

On s'intéresse à la longueur D de l'arc de cercle sous-tendu par KM, d'angle au centre A = (OK, OM). On a donc : D = R.A où R est le rayon de la Terre. Calculons le sinus de l'angle A. Celui-ci est tel que :

$$OK = OM \sin A$$

ce qui donne :

$$\sin A \approx A=\frac{\sqrt{H(H+2R)}}{R+H}$$

d'où on déduit la longueur D de l'arc :

$$D=RA=\frac{R}{R+H}\sqrt{H(H+2R)}=\sqrt{R}\sqrt{H}\sqrt{\frac{1}{1+\frac{H}{R}}+\frac{1}{\left(1+\frac{H}{R}\right)^2}}$$

puisque l'on peut négliger les termes en H/R cette relation se simplifie en : $D=\sqrt{2R}\sqrt{H}$ avec pour rayon moyen de la Terre R = 6370 km et en exprimant D en milles marins, on obtient :

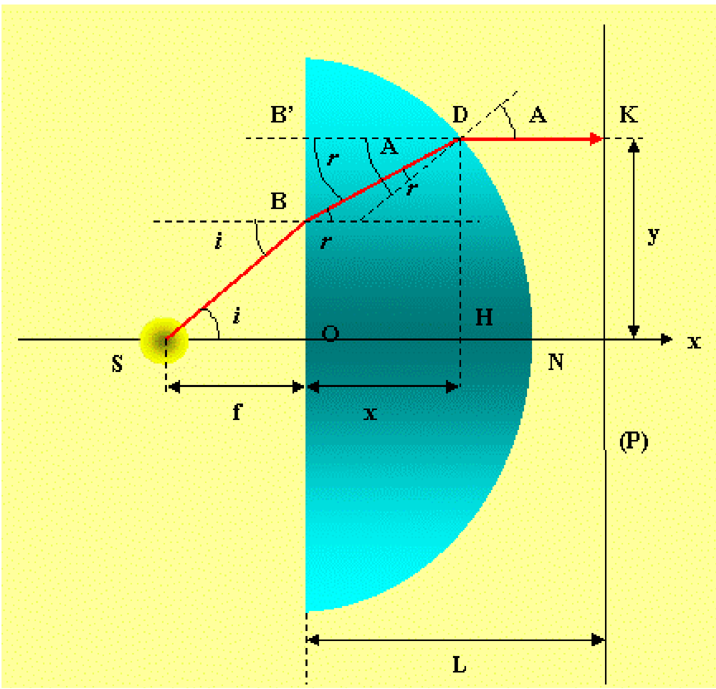
$$D(milles)=1{,}9\sqrt{H(m)}$$

En fait, par les effets de réfraction atmosphérique, la lumière issue de l'amer parcourt un trajet non rectiligne avant d'atteindre l'observateur. Il s'ensuit que les hauteurs observables sont en réalité un peu plus importantes que celles données par les seules considérations géométriques précédentes. La théorie montre que la prise en compte de la réfraction atmosphérique conduit à remplacer le coefficient 1,9 par un coefficient 2,1 légèrement supérieur :

$$D(milles)=2{,}1\sqrt{H(m)}$$

Annexe 2 : Lentille de Fresnel

L'optique des phares doit être conçue de telle manière que le faisceau lumineux qui en émerge soit autant que possible parallèle, ce qui permet d'obtenir un maximum de clarté dans la direction du faisceau. Si l'on utilise pour cela une lentille plan-convexe au foyer de laquelle on place la source de lumière supposée ponctuelle, la partie courbe dirigée vers l'extérieur, les lois de réfraction conduisent à choisir une courbure, et donc une épaisseur, importantes de la lentille. Et par conséquent, un poids très important pour une lentille en verre. Reportons-nous à la figure ci-dessous où nous avons placé une surface plane (P) à une distance arbitraire de la source lumineuse (S). Entre (P) et (S) est intercalée la lentille plan-convexe dont la surface courbe est notée (Σ) et est l'inconnue du problème. L'axe optique de la lentille est Ox. Tout rayon lumineux issu de (S) rencontre la face plane de la lentille en un point B, sort par la face courbe (Σ) en D et atteint (P) en K. On veut calculer (Σ) de façon que DK soit parallèle à l'axe optique Ox quel que soit le chemin SB du rayon incident : on aura ainsi un faisceau parallèle. On note A l'angle fait entre le rayon émergent et la normale de (Σ) au point D.



On utilise les relations et les notations suivantes :

- réfraction au dioptre plan en B : $\sin i = n \sin r$ (a)

- réfraction au dioptre courbe en D : $n \sin r' = \sin A$, où n est l'indice du verre constituant la lentille

- dans le triangle B'DB : $r'=A-r$ et la relation précédente devient alors : $\sin A = n \sin(A-r)$, ce qui fournit la dépendance de A avec l'angle d'incidence i :

$$\tan A = \frac{\sin i}{n \cos r - 1} \quad \text{(b)}$$

où r est donnée par (a).
- distance source-dioptre plan : $SO=f$
- abscisse du point où le rayon ressort de la lentille en D : $OH=x=B'D$
- distance arbitraire entre la face plane et la plan (P) : $B'K=L$

Ecrivons que le chemin optique entre la source lumineuse et le point K du plan où arrive le rayon lumineux est constant quelle que soit l'angle d'incidence i :

$$l=(SK)=SB+n\,BD+DK=constante$$

or on a : $SB=\frac{SO}{\cos i}=\frac{f}{\cos i}$, $BD=\frac{OH}{\cos r}=\frac{x}{\cos r}$, $DK=B'K-B'D=L-x$, d'où le chemin optique :

$$l=\frac{f}{\cos i}+\frac{n\,x}{\cos r}+L-x=constante$$

L étant une constante arbitraire, la quantité suivante est une constante :

$$\frac{f}{\cos i}+x\left(\frac{n}{\cos r}-1\right)=constante=C \quad \text{, avec} \quad C=l-L$$

d'où l'abscisse x du point D où émerge le rayon lumineux de la lentille :

$$x=\frac{C\cos i-f}{\cos i\left(\frac{n}{\cos r}-1\right)} \quad \text{(c)}$$

où r est relié à i par (a).
L'ordonnée de D est obtenue par : $OB'=y=OB+BB'$, avec $OB=f\tan i$, $BB'=x\tan r$, soit :

$$y=f\tan i+x\tan r \quad \text{(d)}$$

(c) et (d) donnent les coordonnées de D sur la surface (Σ) pour une incidence donnée i, donc l'équation de la surface du côté courbe de la lentille, puisque x = x(i) et y = y(i). L'élimination de i entre x et y qui fournirait y = f(x) (équation de la surface) est assez compliquée. Mais on peut trouver une expression analytique simplifiée au voisinage de l'axe optique (i faible), et au bord de la lentille (i grand). En effet, pour de faibles incidences (sin i << 1), l'élimination de i entre (c) et (d), compte tenu de (a), conduit à une expression de la forme (exercice !):

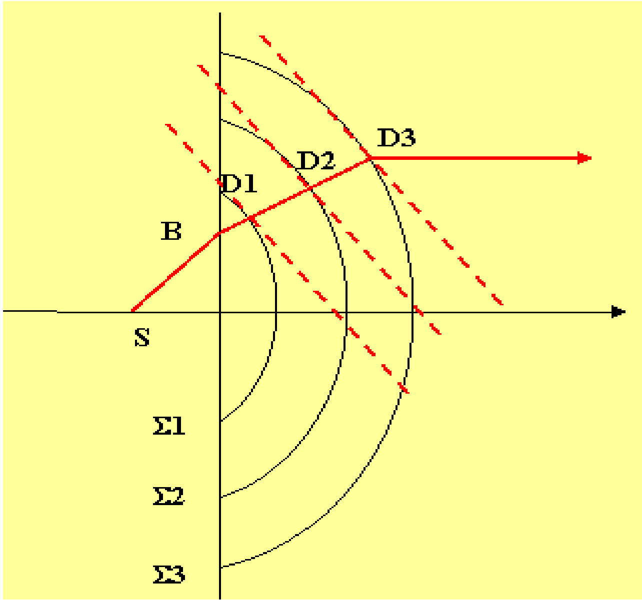
$$y \approx a\,x+b\,x\sqrt{x-c}+d \quad \text{, où a, b, c, d sont des constantes}$$

tandis que pour des i proches de π/2 (donc 1-sin² i ≈ ε << 1), la génératrice de la surface est assimilable à une droite :

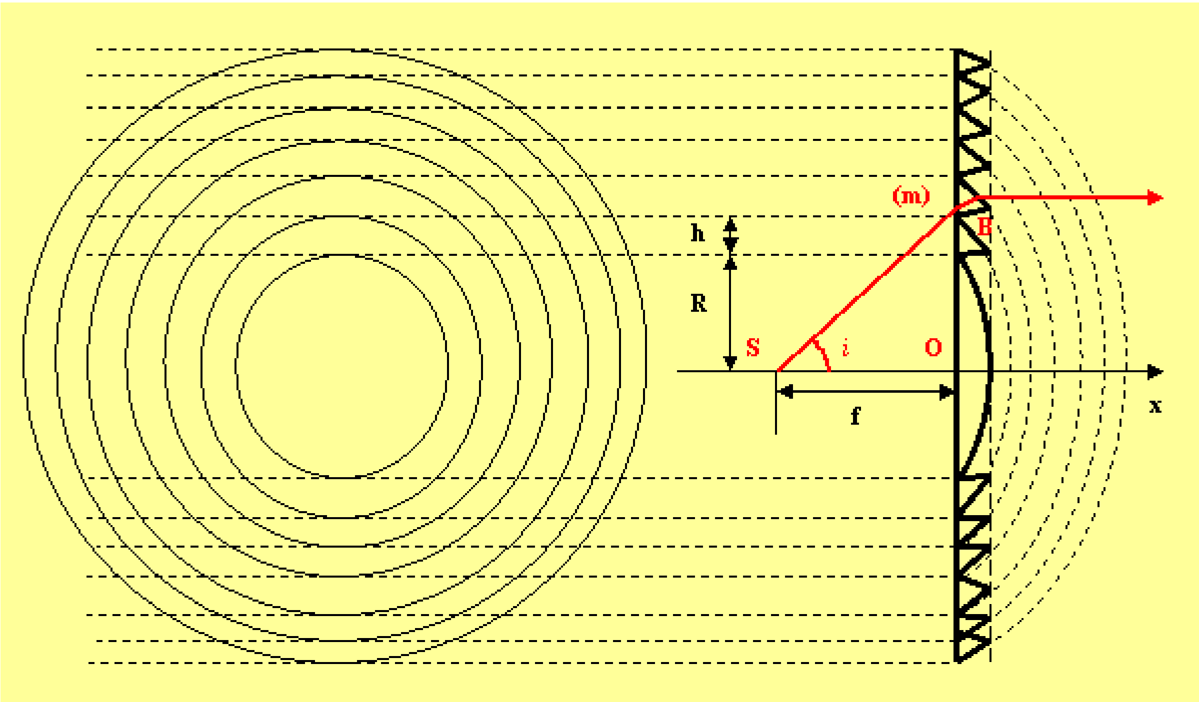
$$y \approx b'-a'x \quad \text{où a' et b' constantes}$$

Conclusion : la lentille n'est pas sphérique.

En fait, on obtient un ensemble de surfaces (Σ) paramétrées par la constante arbitraire C. Il est facile de vérifier que ces surfaces sont parallèles. En effet, la relation (b) montre que sur un même trajet lumineux, donc pour une même incidence (même point B), les tangentes aux surfaces sont parallèles (voir figure ci-après) :



Cette propriété est mise à profit pour obtenir un faisceau parallèle de lumière émise avec une lentille la plus légère possible. Une lentille en un seul bloc serait lourde et épaisse, ce qui entraîne des contraintes mécaniques sur le dispositif de rotation de l'optique du phare. L'idée consiste alors à utiliser, au lieu d'une lentille unique, des parties du réseau des surfaces (Σk) correspondant à chaque incidence considérée. Ces parties s'appellent des échelons : ce sont des surfaces annulaires, de révolution autour de l'axe optique Ox, choisies de faible épaisseur donc au plus près du dioptre plan (voir figure suivante).



Soit R le rayon de la lentille centrale, h la largeur de chaque anneau des surfaces partielles, m le rang de l'une quelconque de ces surfaces (m = 0 correspond à la lentille centrale). Les anneaux sont suffisamment nombreux pour que l'angle de sortie du rayon lumineux A soit pratiquement constant sur leurs surfaces, ou, ce qui revient au même, pour que l'anneau corresponde à un angle d'incidence identique i. Dans ce cas, on peut écrire :

$$SB^2 = f^2 + OB^2 = f^2 + (R + m\,h)^2$$
$$\sin i = \frac{OB}{SB} = \frac{R + m\,h}{\sqrt{f^2 + (R + m\,h)^2}}$$

la relation (a) devient alors :

$$\tan A = \frac{\sin i}{n\sqrt{1 - \frac{\sin^2 i}{n^2}} - 1}$$

soit, compte tenu de ce qui précède :

$$\tan A = \frac{R + m\,h}{\sqrt{n^2 f^2 + (R + m\,h)^2 (n^2 - 1)} - 1} \quad \text{(e)}$$

Cette relation (e) montre que l'angle de sortie que fait le rayon lumineux avec la normale à la surface du dioptre dépend uniquement du rang de la surface annulaire considérée.

Quelques références

- site gouvernemental sur la navigation et les feux : http://www.mer.equipement.gouv.fr/03_navigation/03_signalisation/phares.htm

- site du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM) : http://www.shom.fr/

- René Gast, *Phares de France*, éditions Ouest France

- J.P. Dumontier, R. Gast, *Des phares et des hommes*, éditions EMOM, Paris, 1985

- Cours de navigation, Ecole Navale, 1988.