

LE PRINCIPE DU TEST DE FOUCAULT

Didier CADIOU

L'auteur a construit son télescope en 1989 à l'atelier de Albert LASSORT. La taille du miroir, le travail sur le verre, le verre lui-même ont exercé sur lui une sorte de fascination. Savez-vous que le verre est un liquide ?

Contrôlez vous-même la qualité optique de votre miroir de télescope.

Léon Foucault, autodidacte de génie, a inventé une méthode qui, grâce à un appareil très simple, permet de mesurer et de contrôler la surface des miroirs de télescope avec une extrême précision : les défauts du verre, plus petits que la longueur d'onde de la lumière, nous apparaissent soudain comme des précipices ou des montagnes !

Ce petit fascicule vous rappelle des notions d'optique instrumentale de base d'une manière simple, puis explique pas à pas la méthode de Foucault.



SOCIÉTÉ
d'ASTRONOMIE
de NANTES

Prix : X,00 €

Société Scientifique d'Éducation Populaire agréée Jeunesse et Sports

35, boulevard Louis Millet - 44300 NANTES - Tél. 02 40 68 91 20 - Fax 02 40 93 81 23

Internet : www.san-fr.com - E-mail : san@san-fr.com



N° 1

LE PRINCIPE DU TEST DE FOUCAULT

Didier CADIOU



Les Cahiers de la SAN

Les « **Cahiers de la SAN** » sont édités par la Société d'Astronomie de Nantes,
Société Scientifique d'Éducation Populaire agréée Jeunesse et Sports.

35, boulevard Louis-Millet

44300 NANTES

Tél. 02 40 68 91 20 - Fax 02 40 93 81 23 - E-mail : san@san-fr.com

© Toute reproduction intégrale ou partielle faite par quelque procédé que ce soit,
sans l'autorisation de la Société d'Astronomie de Nantes, est interdite.

Bibliographie

C'est grâce aux explications de M. Lassort et à la pratique du "Foucaultage" dans son atelier que le présent cahier a pu être réalisé.

Il convient ensuite de citer les deux ouvrages "quasi mythiques" pour un astronome amateur et qu'il faut avoir consulté au moins une fois dans la vie, tous deux étonnants de clarté quand il s'agit d'expliquer les phénomènes les plus complexes :

- **Lunettes et télescopes** d'André Danjon et André Couderc, édité en 1935 par la Librairie Scientifique et Technique Albert Blanchard, heureusement réédité en 1990.
- **La Construction du télescope d'amateur** de Jean Texereau, malheureusement pas réédité et presque introuvable.

Voici des ouvrages plus généraux d'optique également très précieux à consulter :

- **Calcul des combinaisons optiques** d'Henri Chrétien édité en 1959 à la librairie Lavoisier.
- **Optique instrumentale** de G.A. Boutry édité en 1946 par la Librairie Masson.

Remerciements

Quand nous parlons de miroir de télescope, notre première pensée est pour M. Lassort. Son atelier nantais hors du commun est minuscule par la taille mais immense par le savoir que le maître des lieux dispense doucement aux apprentis opticiens, sans que chacun s'en aperçoive.

Si je tentais de décrire le centième de ce qui se passe à l'atelier, je dirais :

- *atmosphère bizarre qui fait qu'on s'y sent bien comme dans une bibliothèque*
- *vocabulaire et syntaxe (on parle correctement français à l'atelier !)*
- *poésie (Lamartine...)*
- *biologie, microscope (graines examinées au microscope avant les semailles)*
- *chimie (noircir les coulants, argenter, acides, gaz hilarant ! soigner les bobos etc.)*
- *électronique (entraînement horaire, oscilloscope...)*
- *informatique et calculs (les programmes sur HP...)*
- *mécanique, tour, les centaines de machines inventées par le maître : machine à grande vitesse MGX, machine à découper le métal, machine à découper le verre, machine à balancer la Duchesse ! etc.)*
- *optique (depuis la dalle de verre jusqu'au miroir parfait ou simplement très bon ! test de Foucault, découpe de verre, machine à polir, moule à poix etc.)*
- *menuiserie (il faut bien un tube au télescope !)*
- *radiophonie (postes radioamateur fesi...)*
- *apiculture (les ruches, la récolte du miel...)*
- *agriculture (les patates...)*
- *vigne (le raisin à piétiner en septembre...)*

La qualité optique

Nous avons vu toutes les opérations à mener pour connaître quantitativement la forme de la surface d'onde réfléchi par un miroir. La retouche d'un miroir de télescope est menée par polissage de façon à abaisser la surface là où l'onde réfléchi est en avance.

Mais quand pouvons-nous savoir si le travail est terminé ?

Si nous obtenons sur le graphique un tracé du profil de l'onde qui présente un large dôme avec des flancs régulièrement inclinés, il faut porter l'attention sur la valeur du plus grand écart de tautochronisme ϵ . Selon la règle de Lord Rayleigh, le plus grand écart ne doit pas dépasser 0,25. C'est-à-dire que l'onde réfléchi ne doit pas présenter des écarts supérieurs au quart de la longueur d'onde de la lumière.

Si le tracé est très accidenté avec des angles pointus tout en satisfaisant à la règle de Rayleigh, le rayon du cercle de moindre aberration peut valoir plusieurs fois celui de la tache de diffraction r et les images seront mal contrastées.

Règle

Le miroir sera bon si :

- les aberrations transversales réduites sont inférieures à l'unité (figure 25) ; ce qui signifie que le rayon du cercle de moindre aberration est comparable à celui de la tache de diffraction théorique.

- le plus grand écart de tautochronisme est au plus égal à $1/4$ d'onde et une grande majorité des autres écarts est bien inférieure à cette valeur.



Table des Matières

Introduction	7
Optique Géométrique	8
La réflexion	8
Surface d'onde	8
Stigmatisme	9
Image	10
Surfaces stigmatiques par réflexion	10
Calcul de la forme d'un miroir stigmatique	11
Conditions d'emploi du miroir	13
Aplanétisme	13
Sphère osculatrice	15
Conditions de contrôle du miroir	16
Le test de Foucault	18
Solide différentiel	18
Principe du test de Foucault	19
Examen d'un miroir sphérique au test de Foucault ...	20
Examen d'un miroir parabolique au test de Foucault .	22
L'écran à échancrures	23
Les mesures	26
Rappels	26
Marche à suivre	26
(1) (2) (3) (4) Bulletin de contrôle	27
(5)(6)(7)(8) Aberrations longitudinales	28
(9) Aberrations transversales au centre de courbure	29
(10) Aberrations transversales au foyer	29
(11) Évaluation de ces aberrations	29
Diagramme des aberrations transversales réduites au foyer	30
(12) Étude de la surface d'onde réfléchi au foyer	31
Tracé du profil de l'onde réfléchi au foyer	32

<i>Recherche de l'onde sphérique la plus voisine</i>	
<i>de l'onde réelle</i>	33
<i>Et mon miroir est à λ sur combien ?</i>	34
<i>La qualité optique</i>	36
<i>Règle</i>	36
<i>Annexe</i>	37
<i>Pourquoi les $h2m / R$?</i>	37

quotients ε des différences de marche δx par la longueur d'onde de la lumière ($0,56 \mu\text{m}$). Ces quotients ε s'appellent les écarts de tautochronisme.

h_x en millimètres	δx en nanomètres	ε	λ sur... ($\lambda = 0,56 \mu\text{m}$)
0,0 mm	-12 nm	-0,021	$\lambda/47$
37,3 mm	0 nm	0	—
64,5 mm	-7 nm	-0,012	$\lambda/80$
83,5 mm	-19 nm	-0,034	$\lambda/29$
99,0 mm	0 nm	0	—

Tableau 2

Par rapport à la sphère de référence S' , les écarts sont négatifs, ils représentent les fractions d'ondulation qui arrivent en retard (creux sur la surface d'onde).

Nous remarquons alors le quotient le plus grand, $\varepsilon = -0,03$, pour la limite supérieure de la zone 3 qui nous donne une différence de marche de $1/29$ d'onde ($0,034 = 1/29$).

Nous pouvons dire que notre miroir est à λ sur 29 : $\lambda/29$!

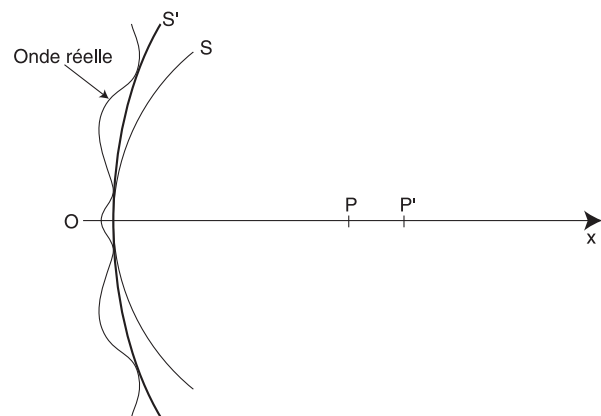


Figure 28

Comment représenter cette sphère ? Est-ce une ligne droite située plus haut sur le graphique ? Non car si la sphère de référence que nous avons choisie (en prenant une valeur de constante dans notre tableau) apparaît comme une ligne droite, c'est bien parce qu'elle ne présente pas de pente par rapport à elle-même dans chaque zone. Si nous prenons une autre sphère de référence, elle apparaît sur notre graphique comme un arc de parabole. En effet, cette nouvelle sphère s'écarte d'autant plus de l'ancienne que nous allons du centre vers le bord du miroir.

La nouvelle sphère de référence S' qui tangente l'onde réelle en deux points B' et E' est tracée comme un arc de parabole sur le graphique.

Et mon miroir est à lambda sur combien ?

Nous pouvons ensuite relever sur le graphique, les écarts AA' , BB' , CC' , DD' et EE' entre la parabole de référence et le profil de l'onde. Ces écarts sont appelés différences de marche dx et nous les reportons dans un deuxième tableau (tableau II) en fonction de la hauteur d'incidence.

Dans la troisième colonne du tableau, nous calculons les

LE PRINCIPE DU TEST DE FOUCAULT

Introduction

Le présent cahier s'attache à décrire la méthode d'examen des miroirs de télescope. Nous présenterons tout d'abord quelques notions d'optique utiles à la compréhension du contrôle.

Les phénomènes optiques seront souvent expliqués de deux manières : selon que la lumière est représentée par des rayons lumineux ou par des surfaces d'onde. Nous verrons le fonctionnement du miroir dans les conditions d'observation. Nous verrons aussi son fonctionnement, tout différent, lorsqu'il est examiné par le test de Foucault pour le contrôler.

Grâce au test de Foucault, nous serons en mesure de dresser le bulletin de contrôle du miroir. Nous pourrions apprécier les plus grands défauts que le miroir imprime à l'onde réfléchie dans les conditions d'observation : le "lambda sur" du miroir.

Optique Géométrique

Nous allons simplement introduire les notions d'optique géométrique auxquelles nous faisons appel dans le contrôle d'un miroir. Nous laisserons de côté ce qui concerne les lentilles minces (réfraction, achromatisme...).

La réflexion

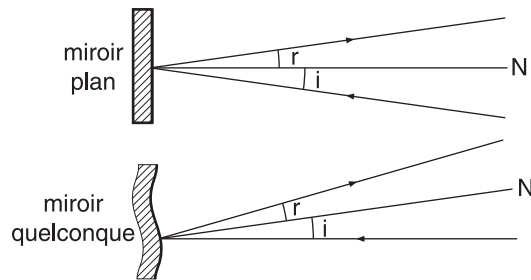


Figure 0

Les lois de la réflexion nous enseignent qu'un rayon lumineux qui arrive sur un miroir, se réfléchit selon la règle suivante : l'angle d'incidence i est égal à l'angle de réflexion r , les angles étant mesurés par rapport à la normale N au miroir.

Surface d'onde

Si on émet de la lumière à partir d'une source, les signaux, qui ont quitté la source à un instant donné, vont former une surface d'onde. Elle va s'éloigner à la vitesse de la lumière.

Les signaux qui appartiennent à la surface d'onde sont dits "en phase".

Dans le cas d'une source ponctuelle S , les surfaces d'onde sont des sphères centrées sur S .

Une surface d'onde est perpendiculaire en chacun de ses points aux rayons lumineux (théorème de Malus).

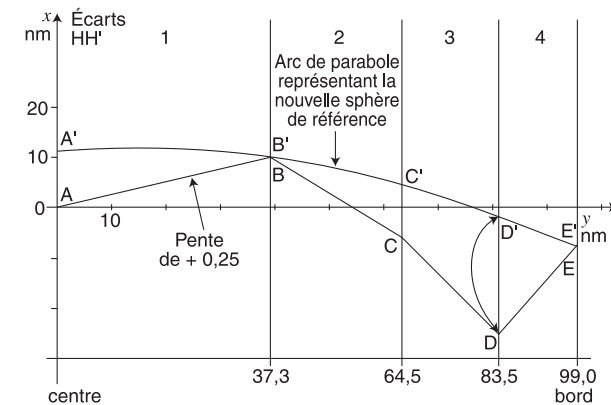


Figure 27

La ligne brisée de notre graphique représente le profil de l'onde réelle.

Comme nous avons multiplié u par 10^6 , la distance des deux méridiennes est agrandie un million de fois. Ainsi, si nous avons une échelle sur Oy graduée en millimètres, l'axe Ox aura une graduation en nanomètres.

La surface de référence S a été déterminée quand nous avons choisi la constante à retrancher dans notre tableau, c'est-à-dire le point P dans le cercle de moindre aberration. Mais nous allons voir que S n'est pas la méridienne la plus proche de notre onde réelle.

Recherche de l'onde sphérique la plus voisine de l'onde réelle

En effet il existe une sphère de référence S' dont le centre P' est situé un peu plus loin sur l'axe que le point P . Elle est plus voisine de notre onde réelle. Comme cette sphère s'écarte moins de l'onde réelle que la précédente, les images seront meilleures en P' qu'en P . Ceci se traduit par le fait que lors de nos observations, l'image la meilleure sera obtenue quand l'oculaire de l'instrument visera le point P' ; P' sera donc le foyer de l'instrument.

Soit HP un rayon qui provient d'un point H' situé à une hauteur d'incidence h sur la sphère de référence. Le rayon réel HI fait avec lui un angle $u = \lambda_F / f$ (λ_F l'aberration longitudinale au foyer est petite devant la focale f). La méridienne de l'onde est inclinée d'un angle u par rapport à la méridienne de la sphère parfaite. Nous calculons donc u pour chacune des zones du miroir et reportons les résultats multipliés par un million (10^6) dans la dernière ligne (12) de notre tableau. Cette multiplication par un million est là simplement pour rendre perceptibles les pentes qui sont extrêmement faibles.

Tracé du profil de l'onde réfléchie au foyer

Prenons pour axe vertical Ox , l'axe de propagation de la lumière et pour axe horizontal Oy , l'axe correspondant au demi-diamètre du miroir. Comme sur le diagramme précédent nous traçons verticalement les limites des zones de l'écran. A partir du point A sur la droite Ox , nous traçons un segment ayant une pente de valeur $-u10^6$ pour la zone 1 (ici $+0,25$) puis nous partons du point B d'arrivée sur la limite de la zone 1 et traçons la pente pour la zone 2 et ainsi de suite jusqu'à la dernière zone près du bord du miroir.

Nous prenons $-u$ au lieu de u car :

- un angle positif correspond à une aberration longitudinale positive (or d'après nos conventions, une aberration positive correspond à des rayons se coupant plus loin du miroir que le foyer) ; la pente de l'onde doit donc être négative sur notre graphique (la normale à la surface est orientée vers l'extérieur)
- un angle négatif correspond à une aberration longitudinale négative (les rayons se coupent plus près du miroir que le foyer) ; la pente de l'onde est donc positive sur notre graphique (la normale à la surface est orientée vers l'axe du miroir).

La ligne AJ confondue avec l'axe Oy représente la demi-méridienne de l'onde sphérique S de référence de centre P .

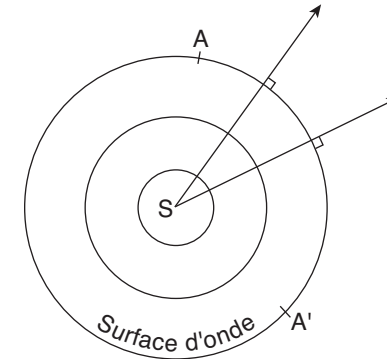


Figure 1

En astronomie, les surfaces d'onde sont souvent assimilables à des plans car la distance des étoiles est infiniment grande.

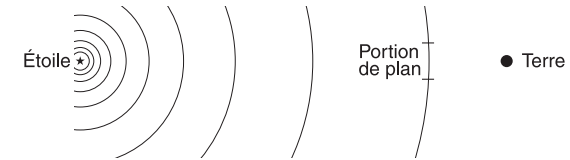


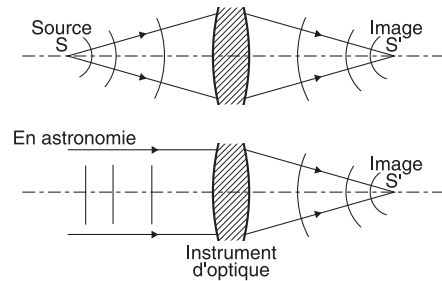
Figure 2

Stigmatisme

Soit une source ponctuelle S , si on sait construire un appareil d'optique capable de faire converger tous les rayons lumineux qu'il reçoit de S vers un point S' , on dit que l'appareil est stigmatique pour le point S .

Avant l'appareil, les surfaces d'onde sont des sphères centrées sur S , en sortant de l'appareil, les surfaces d'onde sont des sphères centrées sur S' . Le chemin optique SS' est le même pour tous les rayons lumineux.

En astronomie, la source S est un astre situé à l'infini, son image S' est à distance finie ; une surface d'onde plane est transformée en une surface d'onde sphérique.



Figures 3 et 4

Image

Si un instrument d'optique est stigmatique pour le point S , on appelle image de S le point S' vers lequel convergent tous les rayons issus de S et qui ont traversé l'instrument d'optique.

Le stigmatisme est la propriété la plus utile pour un instrument d'optique.

Le télescope étant un instrument par réflexion, quelle forme doit avoir le miroir pour être stigmatique ?

Surfaces stigmatiques par réflexion

La source S étant à l'infini, les surfaces d'onde incidentes sont des plans.

A priori, sans trop étudier la question, on pourrait penser qu'un miroir sphérique serait tout désigné pour donner une image parfaite d'une source située à l'infini. Mais la sphère, ne donne une image parfaite d'une source que lorsque celle-ci est située en son centre de courbure.

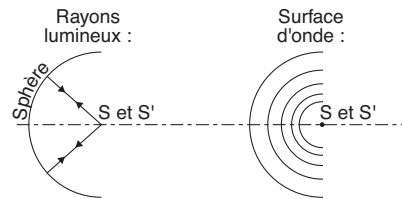


Figure 5

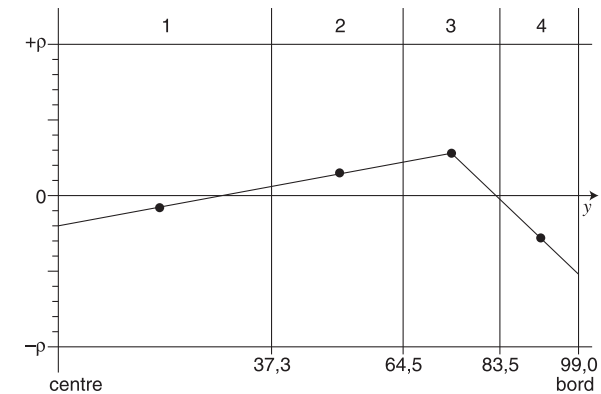


Figure 25

la constante dans notre tableau. Le choix de cette constante K est conventionnel, la meilleure image n'étant pas forcément située à ce niveau.

(12) Étude de la surface d'onde réfléchie au foyer

Les rayons présentent donc des aberrations que nous venons de déterminer. Si les rayons ne présentaient aucune aberration, ils convergeraient au point P et la surface d'onde serait une sphère de centre P . Nous dirions que P est le foyer du miroir. Notre surface d'onde s'écarte de la sphère et il s'agit de savoir de combien.

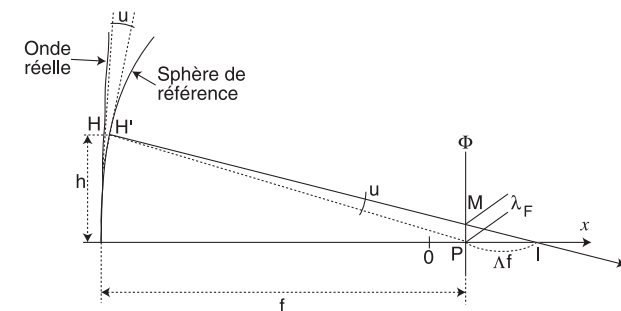


Figure 26

Pour en juger, nous allons les comparer à l'image d'une étoile. L'image d'une étoile observée avec un fort grossissement n'est pas un point mais une tache à cause de la diffraction de la lumière. Cette tache se compose d'un disque lumineux entouré d'anneaux sombres. Le disque central est appelé "faux disque" parce qu'il ne représente pas le disque véritable de l'étoile qui est de toute façon trop lointaine pour avoir un diamètre apparent. Le rayon du faux disque est donné par la formule : $\rho = 1,22 \lambda f/D$ avec $\lambda = 0,56 \mu\text{m}$ la longueur d'onde la plus sensible pour l'œil, f la focale du miroir et D son diamètre.

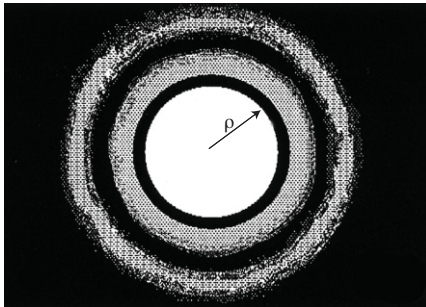


Figure 24

Nous faisons figurer dans le tableau le rapport $\lambda F/\rho$ en ligne 11 qui donne l'importance des aberrations par rapport au rayon de la tache de diffraction ; ce rapport est appelé aberration transversale réduite.

Diagramme des aberrations transversales réduites au foyer

Nous allons représenter graphiquement les aberrations transversales réduites en fonction de la hauteur d'incidence h des rayons réfléchis :

Nous constatons que les plus grandes aberrations de signe positif sont égales à celles de signe négatif, ce qui veut dire que nous avons mesuré les aberrations dans le plan contenant le cercle de moindre aberration. Ceci résulte du choix approprié de

Ceci se conçoit aisément car tous les rayons issus de S ont le même chemin optique pour revenir en S .

Quand la source est située à l'infini, l'image présente une aberration de sphéricité. En effet les rayons issus de la source ne sont pas réfléchis vers le même point selon qu'ils frappent le miroir près du bord (rayons marginaux) ou près du centre (rayons centraux). Les rayons réfléchis marginaux se coupent plus près du miroir que les rayons réfléchis centraux.

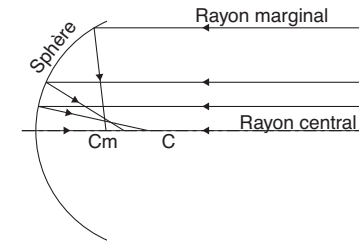


Figure 6

Calcul de la forme d'un miroir stigmatique

Soit une surface de révolution telle qu'une portion de sphère, si l'on coupe cette surface selon un diamètre, la ligne obtenue en coupe est la méridienne de cette surface (ici un arc de cercle).

Pour connaître la forme méridienne du miroir stigmatique, il faut écrire qu'un rayon lumineux marginal a parcouru le même chemin optique qu'un rayon lumineux central.

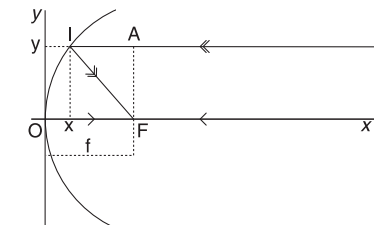


Figure 7

Ainsi le rayon lumineux AIF doit parcourir le même chemin optique que son homologue qui passe par F à l'aller :

$$AI + IF = FO + OF$$

En posant : $FO = OF = f$, distance focale du miroir,

$$\text{On a : } (f - x) + \sqrt{y^2 + (f - x)^2} = 2f$$

$$\text{Soit : } y^2 = 4fx$$

Ce qui correspond à l'équation d'une parabole.

Le miroir d'un instrument parfaitement stigmatique pour une source située à l'infini, sera donc en forme de paraboloïde de révolution (plus communément on dit : parabolique).

f est appelée la distance focale du miroir et le point F , le foyer.

appelés aberrations longitudinales au centre de courbure : $\Lambda_C = \Delta x - b_m^2 / R - K$, nous les notons en ligne 8.

(9) Aberrations transversales au centre de courbure

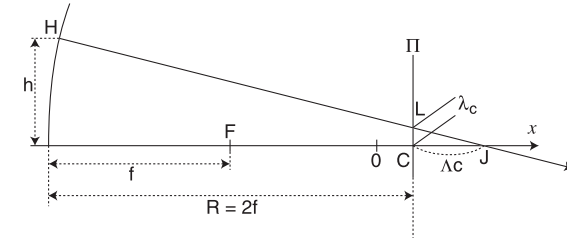


Figure 23

Jusqu'ici nous nous intéressons à la longueur des aberrations sur l'axe, mais ce qui nous intéresse directement c'est la valeur de ces aberrations dans le plan P perpendiculaire à l'axe optique. En effet, l'image formée par l'instrument sera dans un plan.

- L'aberration transversale correspondante est :
 $\lambda_C = \Lambda_C b / 2f$ (Λ_C très petit devant R) ; nous pouvons noter sa valeur en ligne 9.

(10) Aberrations transversales au foyer

- En définitive, la véritable aberration transversale que nous voulons connaître, c'est celle qui existe non pas au centre de courbure dans les conditions de l'examen du miroir mais au foyer quand le miroir forme l'image d'une étoile. L'aberration longitudinale au foyer est deux fois plus petite que la précédente :
 $\lambda_F = \lambda_C / 2 = \Lambda_C b / 4f$; nous la reportons en ligne 10.

(11) Évaluation de ces aberrations

- Mais ces aberrations sont-elles perceptibles par l'observateur ?

- les numéros des zones sur la ligne 1
- les hauteurs d'incidence hx des limites des zones sur la ligne 2
- les hauteurs moyennes d'incidence hm des zones de l'écran sur la ligne 3.
- Nous calculons les h_m^2/R théoriques en divisant le carré de hm par le rayon de courbure R du miroir et reportons le résultat sur la ligne 4.

(5)(6)(7)(8) Aberrations longitudinales

- Nous prenons un zéro arbitraire sur la coulisse et le tambour de l'instrument de Foucault.
- En tournant le tambour de façon à déplacer le couteau d'avant en arrière, nous cherchons la position du couteau qui donne une teinte plate à la zone 1 (zone centrale). Quand nous croyons avoir le bon tirage, nous vérifions qu'en manoeuvrant la molette, nous pouvons éteindre la zone d'un seul coup. Nous notons l'abscisse Δx du tirage en lisant la coulisse puis le tambour.
- Nous procédons de même pour les zones suivantes.
- Nous notons pour chaque zone les valeurs mesurées de tirage en ligne 5.
- Nous retranchons de ces valeurs les h_m^2/R théoriques en ligne 6.
- Si le miroir était parfait, les valeurs obtenues en ligne 6 seraient constantes. Les tirages mesurés seraient égaux aux aberrations longitudinales théoriques à une constante près due au zéro arbitraire que nous avons pris pour les mesures.
- Comme le miroir n'est jamais parfait, les valeurs mesurées présentent des écarts par rapport aux valeurs des aberrations longitudinales théoriques. À ce stade, il nous faut choisir une constante K (ligne 7) que nous allons retrancher aux valeurs de la ligne 6 pour connaître les défauts propres au miroir réel. Ces défauts sont

Conditions d'emploi du miroir

Le miroir est donc parabolique, l'image d'une étoile au centre du champ se forme au point F , le foyer.

Si nous représentons la lumière de l'étoile par des rayons, ceux-ci sont parallèles entre eux et sont réfléchis par le miroir en F .

Si nous représentons la lumière par des surfaces d'onde, celles-ci sont planes avant de frapper le miroir et sphériques après réflexion. Le foyer F est alors le centre des sphères.

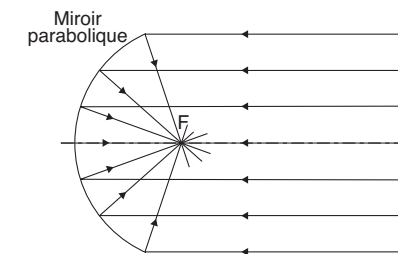


Figure 8

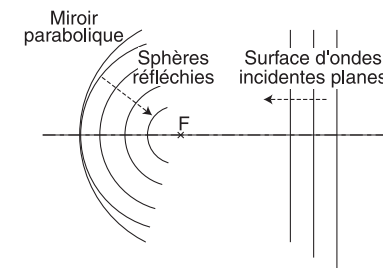


Figure 9

Aplanétisme

L'aplanétisme est la propriété d'un instrument d'optique qui est dépourvu d'aberration de sphéricité et de l'aberration hors de l'axe la plus grave : la coma.

Supposons que notre miroir soit stigmatique, on observe une image parfaite d'une étoile E située sur son axe optique :

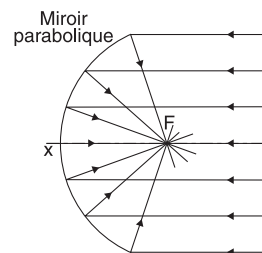


Figure 10

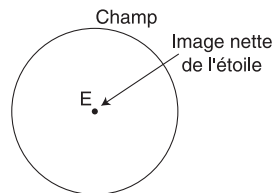


Figure 11

On aimerait que cette propriété se conserve pour une autre étoile E' au voisinage de E . Un instrument de ce type est dit aplanétique.

Mais les miroirs paraboliques ne sont pas aplanétiques : l'image E' de l'étoile E située hors de l'axe du miroir, se forme dans le plan focal avec une aberration. Cette aberration s'appelle la coma. Elle donne d'une étoile, non pas une image ponctuelle mais une aigrette qui, dans le cas du miroir parabolique, dirige sa pointe vers le foyer.

Ce défaut n'est pas gênant pour l'observation courante

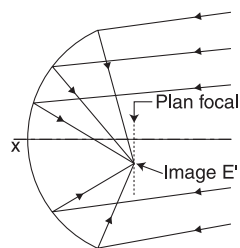


Figure 12

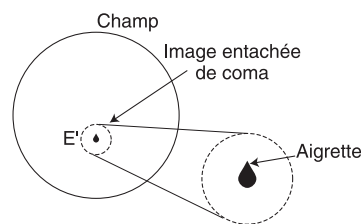


Figure 13

mais le devient si l'on désire faire des photographies à grand champ.

- et enfin nous pourrions apprécier la qualité optique de notre miroir en calculant le quotient λ/x sur l'onde.

Caractéristiques du miroir :				
$D_{\text{ext}} = 199$	$D_{\text{opt}} = 198$	épais = 0,37	$R = 2430$	$f/D = 6,13$
$\rho = 1,22.\lambda.6,13 = 4,2 \mu$				
(1) zones de l'écran	1	2	3	4
(2) hauteur d'incidence h_x des limites de zones en mm	37,3	64,5	83,5	99,0
(3) hauteur d'incidence moyenne h_m des zones en mm	18,6	50,9	74,0	91,2
(4) h_m^2 / R théoriques en mm d'un paraboloïde parfait de rayon de courbure R	0,14	1,07	2,25	3,42
(5) tirages Δx mesurés en mm	29,44	30,51	31,70	32,74
(6) différence entre mesure et théorie $\Delta x - h_m^2 / R$	29,3	29,44	29,45	29,32
(7) constante à retrancher $K = 29,38$ en mm	29,38	29,38	29,38	29,38
(8) aberration longitudinale au centre de courbure en mm $\Delta c = \Delta x - h_m^2 / R - K$	- 0,08	0,06	0,07	- 0,06
(9) aberration transversale au centre de courbure $\Delta c = \Delta_c \cdot h_m / 2f$ en μ	0,61	1,25	2,13	2,25
(10) aberration transversale au foyer : $\lambda F = \Delta_c \cdot h_m / 4f$ en μ	- 0,31	0,63	1,06	- 1,12
(11) aberration transversale réduite $\lambda F / \rho$	- 0,07	0,14	0,25	- 0,27
(12) angles (-u.10 ⁶) en millionnièmes de radians $u = \lambda F / f$	0,25	-0,50	-0,87	0,92

Tableau 1

(1) (2) (3) (4) Bulletin de contrôle

Pour réaliser notre bulletin de contrôle, nous portons dans un tableau (tableau 1) qui comporte autant de colonnes que de zones :

Les mesures

Rappels

Nous avons placé le test de Foucault au centre de courbure du miroir et disposé l'écran à échancrures sur le miroir. Si le miroir est parabolique, les rayons réfléchis présentent une aberration de sphéricité. Nous nous employons à mesurer cette aberration très précisément pour déterminer si le miroir est bon ou s'il doit être encore travaillé.

Marche à suivre

La marche à suivre va être la suivante :

- nous recherchons les *aberrations longitudinales au centre de courbure* qui sont dues aux écarts du miroir par rapport au paraboloïde parfait ;
- puis nous allons calculer les *valeurs transversales des aberrations au centre de courbure* en vue d'en connaître les effets dans le plan focal ;
- nous calculerons les *valeurs de ces aberrations transversales* non plus au centre de courbure mais *au foyer*, où nous observerons nos images plus tard ;
- nous nous ferons une bonne idée de ces aberrations en les comparant à l'image d'une étoile : *les aberrations transversales réduites au foyer* ;
- nous tracerons le *diagramme des aberrations transversales réduites* en fonction de la hauteur d'incidence ;
- nous étudierons la *surface d'onde réfléchie au foyer* en calculant la pente de cette onde dans chaque zone par rapport à la sphère de référence ;
- nous tracerons le *profil de l'onde réfléchie au foyer*
- sur le graphique, nous rechercherons une autre *sphère de référence plus voisine* de notre onde réfléchie ;

Sphère osculatrice

Le principe appliqué pour la taille d'un miroir de télescope, est l'usure mutuelle de deux disques de verre par un frottement qui s'exerce en tous sens. Dans ces conditions, les deux disques prennent spontanément la seule forme qui leur permette de s'adapter l'un à l'autre dans toutes les positions possibles : la sphère. L'un des disques présente une portion de sphère en bosse, l'outil, l'autre présente une portion de sphère en creux, le futur miroir.

C'est à partir de la portion de sphère idéale ainsi obtenue que l'on va imprimer une usure particulière au miroir. Cette usure va déformer la sphère pour obtenir la forme parabolique idéale.

Pour une parabole donnée de focale f , une sphère est dite "osculatrice" quand elle a son point de contact avec le sommet S de la parabole et son rayon de courbure à $R = 2f$.

Pour paraboliser notre miroir sphérique, il est plus aisé de partir de la sphère osculatrice au sommet S de la parabole et de rabattre progressivement le bord. Mais il serait plus avantageux de partir d'une sphère qui est tangente à la parabole à la hauteur $y = 0,707 H$, H étant le demi-diamètre du miroir et d'enfoncer progressivement la surface jusqu'à celle du paraboloïde.

En effet, l'épaisseur de verre à enlever au bord est alors la même qu'au centre. Le volume de verre à ôter est le seizième de celui qu'on aurait si on partait de la sphère osculatrice au sommet.

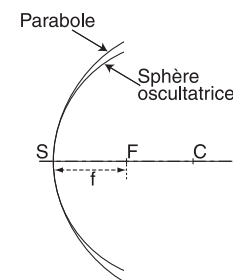


Figure 14 a

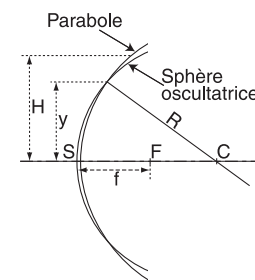


Figure 14 b

Conditions de contrôle du miroir

Pour contrôler le miroir, nous allons émettre de la lumière depuis une source ponctuelle S et observer son image réfléchi. Effectuer le contrôle dans les mêmes conditions que celles de l'observation astronomique, serait impossible car il faudrait éloigner infiniment la source et observer au foyer !

Ainsi nous opérons au centre de courbure du miroir. Nous plaçons une source au voisinage du centre et nous observons son image qui se forme symétriquement par rapport au centre.

Dans ces conditions, comme on l'a vu plus haut, seul un miroir sphérique donne une image parfaite en son centre (ou au voisinage si la source n'est pas exactement au centre).

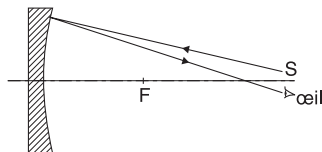


Figure 15

Le miroir parabolique présente par contre une aberration de sphéricité, les rayons qui se réfléchissent près du milieu du miroir (rayons centraux) convergent en C . Ceux qui se réfléchissent près du bord (rayons marginaux) convergent en un autre point A situé plus loin sur l'axe. Nous allons justement en profiter pour mesurer cette longueur CA et ainsi contrôler la forme de la parabole.

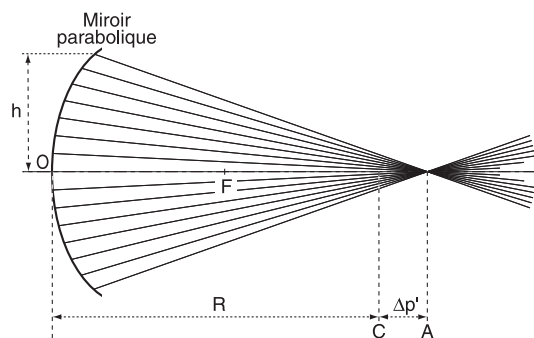


Figure 16

d'apprécier une mesure au milieu de deux divisions sur le tambour. En pratique, la difficulté est d'obtenir une teinte plate dans les deux fenêtres de la zone et la position du couteau n'est connue qu'avec une marge d'erreur supérieure au cinquantième de millimètre.

Chaque fenêtre doit être assez étroite pour que la portion du miroir qu'elle découvre puisse paraître en teinte plate. Comme un miroir parabolique s'écarte d'autant plus de la sphère que l'on s'écarte du centre, les fenêtres sont d'autant plus étroites qu'elles se situent plus près du bord. Comme les zones doivent être contiguës, on choisit les rayons qui les limitent tels que leurs carrés soient en progression arithmétique.

$$h_m^2 = \frac{(Rn^2 + R'n^2)}{2}$$

Au test de Foucault, on voit pour une zone donnée, une fenêtre brillante et l'autre sombre. L'appareil va nous servir à chercher le point d'intersection des rayons réfléchis d'une zone. Pour le connaître, il faut agir sur le tirage de façon à faire apparaître une même teinte dans les deux fenêtres de la zone.

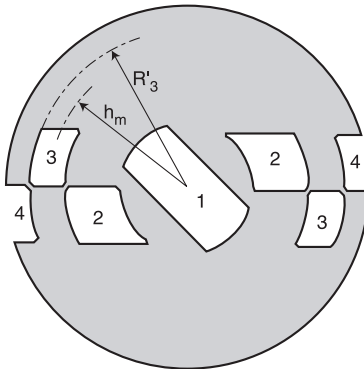


Figure 22

Comme on l'a vu plus haut, le couteau est alors au centre de courbure de la zone. On sait que l'on est exactement au centre quand, à l'aide de la molette qui fait bouger le couteau latéralement, on peut éteindre d'un seul coup les deux fenêtres. Comme les fenêtres apparaissent entourées d'un liseré de diffraction très brillant, nous apprécions mieux le milieu de la fenêtre, c'est pourquoi nous prendrons comme hauteur moyenne d'incidence :

$$h_m = R'_n - R_n$$

Il y a 50 graduations sur le tambour et un tour complet du tambour provoque un tirage d'un millimètre du couteau par rapport à la coulisse. On lit le tirage du couteau au cinquantième de millimètre près et même au centième puisqu'il est facile

On émet donc de la lumière à partir du centre de courbure C du miroir. Après réflexion, l'énergie lumineuse se répartit en forme d'entonnoir appelé surface caustique, dont la pointe est dirigée vers le miroir.

La surface caustique est la figure formée dans l'espace par l'ensemble des points particulièrement éclairés. Elle comporte d'une part la portion CA de l'axe et d'autre part la surface de révolution qui a pour méridienne la courbe CM .

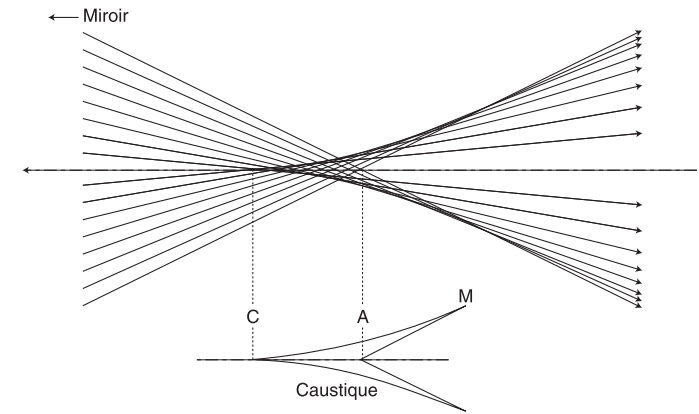


Figure 17

La longueur du segment CA s'appelle l'aberration longitudinale théorique $\Delta p'tb$.

Quelle est la valeur de cette longueur ?

On démontre que l'aberration longitudinale théorique est (voir en annexe pourquoi) :

$$\Delta p'tb = \frac{h^2}{R}$$

L'aberration est proportionnelle au carré de la hauteur d'incidence h des rayons réfléchis et inversement proportionnelle au rayon de courbure R du miroir. Ce résultat est très important car il va nous servir directement à contrôler le miroir avec l'appareil de Foucault : le "test de FOUCAULT".

Le test de Foucault

Nous avons vu que :

- un miroir parabolique donne une image stigmatique pour une source située à l'infini et dans l'axe du miroir (ou proche de l'axe)
- l'examen de ce miroir en son centre de courbure (la source est alors placée au centre de courbure de la sphère osculatrice), donne lieu à une aberration de sphéricité
- cette aberration est du genre "sur-correction", ce qui veut simplement dire que les rayons centraux se coupent plus près du miroir que les rayons marginaux
- que dans ce cas, tous les rayons réfléchis coupent l'axe du miroir non pas en un point mais en une infinité de points qui dépendent de la hauteur d'incidence ; le segment ainsi formé s'appelle l'aberration longitudinale.

Solide différentiel

Le solide différentiel est simplement la différence entre la surface d'onde réfléchie et une certaine sphère prise comme

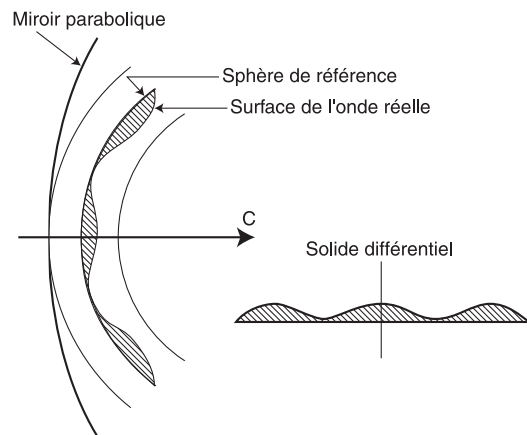


Figure 17 b

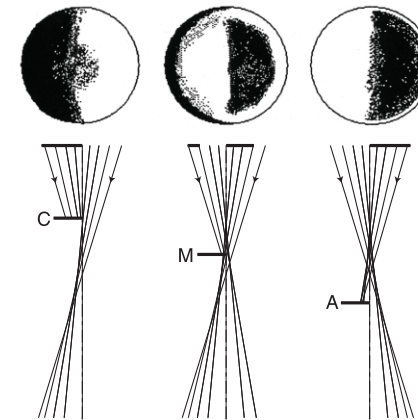


Figure 21

seraient seulement plus ou moins contrastées. Il nous faut donc mesurer la longueur de l'aberration longitudinale sur plusieurs zones du miroir, du centre vers le bord, et comparer la valeur à celle obtenue par le calcul pour savoir si le miroir est parabolique.

Or nous avons vu que l'aberration longitudinale théorique est fonction de la hauteur d'incidence h des rayons réfléchis. Nous allons disposer devant le miroir un écran pourvu de fenêtres laissant passer les rayons de différentes hauteurs d'incidence.

L'écran à échancrures

L'écran se présente sous la forme d'un disque (en carton). Il est de même diamètre que le miroir et pourvu de fenêtres qui laissent apercevoir des zones qui se suivent depuis le centre vers le bord. Une zone est déterminée par deux fenêtres diamétralement opposées.

Comme on connaît le rayon intérieur R_n et le rayon extérieur R'_n d'une zone n , on en connaît la hauteur d'incidence moyenne théorique h_m des rayons lumineux qui s'y réfléchiront :

Examen d'un miroir parabolique au test de Foucault

Si le miroir est parabolique, il n'est donc pas stigmatique pour la source située au voisinage du centre de courbure C de la sphère osculatrice. Il présente une aberration de sphéricité.

- Lorsque le couteau est situé en C , point image relatif à la sphère des rayons centraux, le centre du miroir apparaît plat. Les rayons venant de cette région reviennent tous exactement et en même temps à l'œil de l'observateur (la surface d'onde locale à cette région est quasiment sphérique). Le couteau étant bien réglé latéralement, le pourtour apparaît progressivement déprimé puisque les rayons se réfléchissent derrière notre couteau.

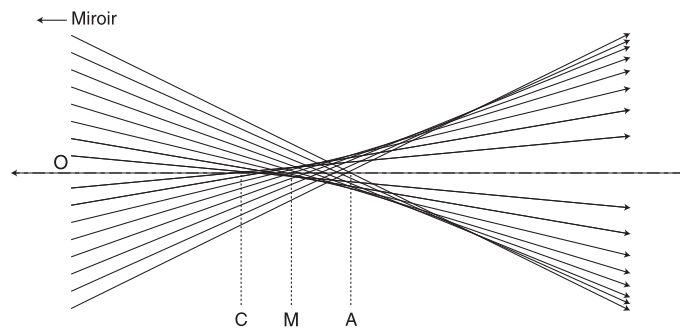


Figure 20

- Lorsque le couteau est reculé en arrière de C , en M , nous changeons de sphère de référence. Le centre du miroir apparaît maintenant concave, le bord étant moins déprimé.
- Lorsque le couteau est éloigné jusqu'au plan contenant l'intersection des rayons marginaux, en A , la sphère de référence est tangente à l'onde le long de son contour. Le miroir ressemble à une profonde cuvette dont le bord est plat.

Les apparences qui viennent d'être décrites seraient les mêmes si le miroir était hyperbolique ou elliptique. Les ombres

référence. En particulier si la surface d'onde est sphérique et que l'on prend comme référence la sphère de même centre de courbure que la surface d'onde, le solide différentiel est plat.

Principe du test de Foucault

Nous disposons d'un moyen qui nous permet de voir directement le solide différentiel, c'est le test de Foucault. Ce procédé fut inventé en 1857 par Léon FOUCAULT (1819 -1868). Il s'agit d'un instrument composé principalement d'une source lumineuse derrière une fente de Young et d'un écran mobile opaque appelé couteau dont un bord est extrêmement rectiligne et parallèle à la fente. La source émet un faisceau lumineux vers le miroir et le couteau intercepte, suivant sa position, une partie des rayons réfléchis.

L'instrument est placé de façon à ce que la source et le couteau soient de part et d'autre du centre de courbure du miroir. L'écart entre la source et le couteau est très petit devant le rayon de courbure du miroir. Le couteau est mobile :

- latéralement (gauche-droite) avec la molette pour le réglage des ombres sur le miroir
- d'avant en arrière (le tirage) avec la vis micrométrique pour le choix de la sphère de référence du solide différentiel.

La vis micrométrique est entourée d'un tambour gradué qui apporte une grande précision à la valeur qui est lue sur la coulisse.

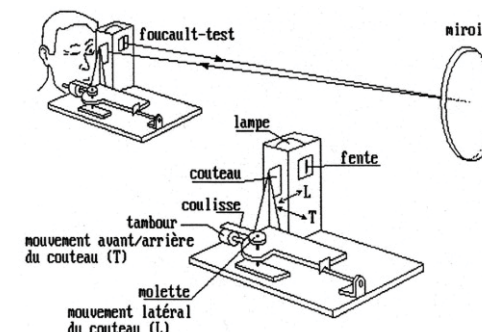


Figure 18

Examen d'un miroir sphérique au test de Foucault

Si le miroir est sphérique, il est donc stigmatique pour la source située au voisinage du centre de courbure C (position $c2$).

- Sans couteau, l'observateur voit le miroir uniformément éclairé. Tous les rayons émis par la source se réfléchissent en un point où justement l'observateur place son œil.
- Lorsque le couteau est situé en avant du centre de courbure, en $c1$, et qu'il avance dans le faisceau de gauche à droite, il intercepte en premier les rayons qui viennent du bord du miroir situé du même côté que lui. L'observateur voit une ombre qui envahit le miroir en progressant dans le même sens que le couteau.

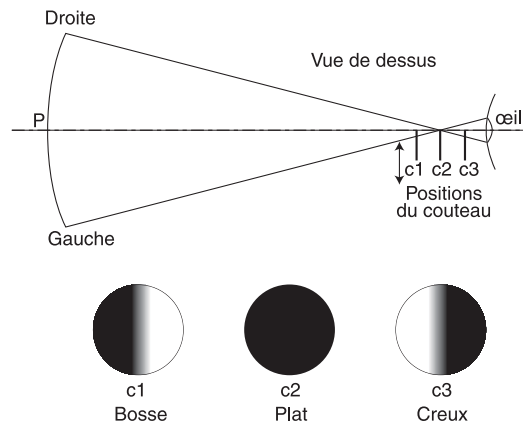


Figure 19

L'image que l'observateur perçoit est le solide différentiel, donc le volume compris entre l'onde et la sphère de référence. La sphère de référence est la sphère dont le centre est défini par l'intersection du tranchant du couteau et de l'axe optique du miroir, ici $c1$, son sommet étant en P . Comme $c1$ est plus près du miroir que $c2$, la sphère de référence est plus concave que l'onde. Elle apparaît en forme de bosse (fig. 19b). C'est bien ce que suggère l'aspect de l'ombre si l'on considère qu'elle est l'ombre propre d'un solide éclairé par la droite.

l'ombre propre d'un solide éclairé par la droite, côté opposé au couteau.

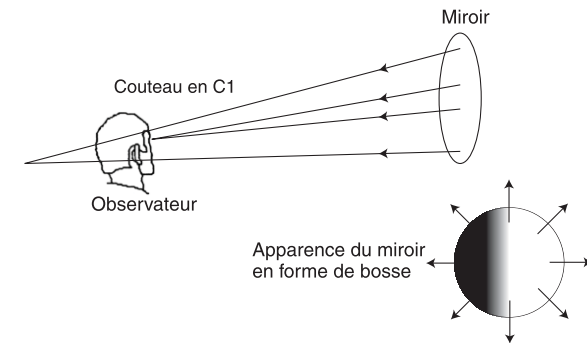


Figure 19 b

- Lorsque le couteau est situé en arrière du centre de courbure, en $c3$, et qu'il avance dans le faisceau de gauche à droite, il intercepte en premier les rayons qui viennent du bord droit du miroir. L'observateur voit une ombre qui envahit le miroir en progressant dans le sens inverse du mouvement du couteau.

La sphère de référence est ici la sphère dont le centre est $c3$. Comme $c3$ est plus loin du miroir que $c2$, la sphère de référence est moins concave que l'onde. Elle apparaît en creux. C'est ce que suggère l'aspect de l'ombre si l'on considère qu'elle est l'ombre propre d'un solide éclairé par la droite.

- Lorsque le couteau est situé juste au niveau de $c2$, et qu'il avance sur l'image formée par le miroir, l'observateur voit la surface entière du miroir s'obscurcir progressivement puis s'éteindre. Il n'y a pas de différence de courbure entre la sphère de référence et l'onde.