

ANNEXE DES ÉTUDES SUR L'INTERFÉROMÉTRIE

LE CONTRASTE DE PHASE

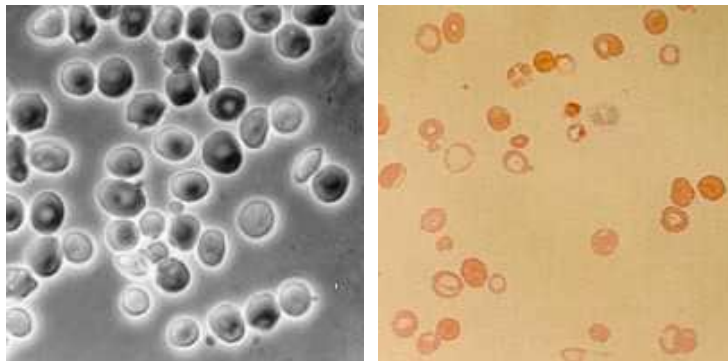
1. HISTOIRE

1.1. FREDERICK ZERNIKE

Dit Frits Zernike. Né à Amsterdam en 1888. Décédé en 1966.

Prix Nobel de physique 1953 pour le microscope à contraste de phase. Il permet d'observer les détails des milieux transparents et incolores qui ne se différencient que par un faible déphasage de la lumière (par exemple lié à une différence d'indice de réfraction). Ainsi en biologie, il permet d'observer le fonctionnement des cellules sans avoir à y injecter des produits de contraste.

Image de cellules par contraste de phase (à gauche) et par coloration (à droite)



Zernike a ensuite étendue cette technique au contrôle des optiques en collaboration avec B. Lyot.

1.2. BERNARD LYOT

Astronome Français inventeur du coronographe qui permet d'observer la couronne et les protubérances solaires.

Un coronographe nécessite des optiques avec très peu de défaut de surface afin de réduire la diffusion de la lumière du disque solaire qui masquerait la faible luminosité de la couronne ou des protubérances. Le contraste de phase permet de voir ces défauts de surface et donc de maîtriser la fabrication des optiques de coronographe.

1.3. JEAN TEXEREAU

Il a popularisé les techniques de fabrication des miroirs de télescope. Pour cela il a, entre autres, testé différentes techniques de polissage dont il a montré l'intérêt de contrôler les résultats par contraste de phase. À voir sur <http://www.astrosurf.com/tests/articles/default/default.htm>.

1.4. ASTROTÉLESCOPE

Jean-Marc Leclaire, de la société Astrotélescope, est l'opticien Français en pointe dans la fabrication des optiques, dites superpolies, qui ont très peu de rugosité ou de micromamelonnage à leur surface. Il les contrôle, entre autres, avec le contraste de phase. À voir sur <http://www.astrotelescope.com/>

Il a réalisé la lentille objectif de l'instrument HACO du système de coronographe CLIMSO installé au Pic du Midi et mis en service en septembre 2007. À voir sur <http://www.climso.fr>.

2. PRINCIPE GÉNÉRAL

Le contraste de phase est utilisé pour voir les défauts dont la hauteur est de l'ordre du nanomètre et dont l'étendue est de l'ordre du millimètre à la surface des miroirs.

Il se met en place comme un test de Foucault en remplaçant le couteau par une lame spéciale.

La lame est faite avec un dépôt d'aluminium sous vide ou avec le dépôt de suie d'une flamme de bougie sur une lame de verre. Il est aussi faisable avec un négatif photographique.

Le dépôt doit atténuer la lumière entre 1/1000 et 1/10 tout en la déphasant, idéalement avec un retard de $\lambda / 4$. De plus le dépôt doit avoir la forme d'un trait à peine plus large que l'image de la fente du Foucault. Car c'est la lumière diffractée en dehors de l'image de la fente, et qui passera autour du trait, qui produira l'image de contraste de phase.

On parle de lame de phase quart d'onde mais aucun opticien ne semble commercialiser ce modèle. Il reste toutefois à explorer la piste des fabricants de microscope.

Pour observer les défauts, on place l'œil ou un appareil photographique juste derrière la lame. Il faut une pupille ou une optique large pour bénéficier des lumières diffractées.

Pour comprendre le phénomène, on doit s'intéresser à l'onde renvoyée par un petit élément de surface de très faible hauteur h par rapport à son environnement. L'onde réfléchie est en légère avance de phase. Elle est décomposable en une première onde égale à celle qui serait obtenue sans le relief (donc non déphasée), plus une seconde représentative du défaut. On montre mathématiquement que la seconde est en avance de phase de $\lambda / 4$ (pour les petits défauts) et qu'elle a une intensité égale à $2h / \lambda$ (de l'incidente).

Cette décomposition transforme donc le petit écart de phase lié au relief en intensité lumineuse.

La seconde onde est émise seulement par la petite surface du défaut. La physique de propagation d'une onde à partir d'un petit élément de surface montre qu'elle est diffractée largement. Au niveau de la lame de phase, ce rayonnement diffracté traverse la lame sans être beaucoup influencé par le dépôt qui n'y occupe qu'une petite surface.

Tandis que la première onde est émise avec celles de tous les points du miroir alentour. Elle est donc peu diffractée et passe essentiellement par l'image de la fente et donc par le dépôt. Après avoir traversé la lame, elle se retrouve donc déphasée et fortement atténuée. On cherche à ce qu'elle soit atténuée au niveau de la seconde onde et en opposition de phase.

Nota bene : La théorie ondulatoire de la lumière montre que les rayonnements émis par une large portion du miroir se retrouvent en phase et forment une interférence constructive dans l'image de la fente. Des rayonnements sont aussi diffractés à côté de l'image de la fente, mais ils sont dans l'ensemble en oppositions et forment une interférence destructive. Pour aller plus dans les détails, il faut tenir compte de ce qui se passe à la frontière des deux phénomènes où l'on trouve des franges de diffractions. Et pour les miroirs asphériques, comme les paraboles, il faut tenir compte des aberrations qui étalent l'image de la fente.

Dans la pratique, pour obtenir une image lumineuse et bien contrastée, il faut augmenter l'intensité de la lampe et élargir la fente du Foucault. Il faut surtout rechercher le bon couple déphasage atténuation. Ce choix est contraint par les possibilités de fabrication de la lame sachant que le déphasage varie avec l'atténuation et le matériau du dépôt.

Derrière la lame de phase, sur la rétine ou sur la pellicule, on peut observer :

- **La surface du miroir** et plus généralement l'environnement des défauts. Son éclairage est filtré par le dépôt. Pour une surface parfaite la teinte est uniforme.
- **Les petits défauts de la surface**. Pour chaque défaut on obtient la figure d'interférence des deux ondes. Pour un défaut en relief la figure d'interférence est destructive et le défaut apparaît noir. Si le couple atténuation déphasage n'est pas approprié la figure d'interférence est faible ou peu contrastée et les défauts sont invisibles.
- **Les poussières, rayures et filandres** qui sont de très petits défauts à pente raide. Ils diffractent tellement la lumière que l'on a surtout des rayons passant à côté du dépôt. On observe des points ou des traits, minuscules et très brillants.
- **Les défauts d'aluminure**, qui sont des surfaces très petites, non aluminées et donc en creux de l'ordre de 100 nanomètres. Comme elles ne réfléchissent que peu de lumière par rapport à l'aluminure, on a un point noir. Mais la figure d'interférence-diffraction autour du point peut donner l'impression d'avoir un petit cercle brillant.

3. RÉFÉRENCES

3.1. RÉFÉRENCES HISTORIQUES

Frederick ZERNIKE. – Diffraction theory of knife edge test and its improved form : the phase contrast method – M. N. A. A. S., 1934, pp. 377-384

Bernard LYOT. – Procédés permettant d'étudier les irrégularités d'une surface optique bien polie – C. R. Ac. Sc., t. 222, 1er avril 1946, pp. 765, 8.

Jean TEXEREAU – La construction du télescope d'amateur – Société Astronomique de France. pp. 63, 88, 284;

Jean TEXEREAU – Les principaux défauts réels des surfaces optiques engendrées par différentes techniques de polissage – Publié dans le bulletin Ciel et Terre, de la Société belge d'Astronomie, de Météorologie et de Physique du Globe, Bruxelles, mars -avril 1950

3.2. LIVRES

Twyman pp. 393-396, 580, 583-586

À commenter...

Suiter pp. 246-249

À commenter...

3.3. RÉFÉRENCES SUR LA TOILE

Herbert Highstone, Dale Eason et quelques autres astronomes amateurs anglo-saxons présentent leur technique de contraste de phase (dont la réalisation des lames de phase avec de la suie) sur le site Starry Ridge. À voir sur <http://starryridge.com>.

Le site de Patrick et Frédéric Lequèvre décrit la technique et il explique comment réaliser des lames de phase avec de la pellicule photo. À voir sur <http://www.astrosurf.com/tests>. L'article de Texereau de 1950 est aussi disponible sur ce même site.

4. DÉTAILS DE LA THÉORIE

4.1. LES DÉFAUTS DES SURFACES OPTIQUES

À développer par type de défauts: par origine et par taille. On peut partir de l'article de Texereau mais manifestement les astronomes ou opticiens professionnels ont fait des recensements complets et plus récents...

4.2. HAUTEUR DES PLUS PETITS DÉFAUTS

La taille de l'atome de silicium est de 0,27 nanomètre.

La molécule de SiO₂, typique du verre ou de la couche de protection de l'aluminure occupe l'équivalent d'un cube de 0,35 nanomètre d'arête.

Pour les miroirs aluminés non protégés, la surface est oxydée en Al₂O₃. Cette molécule occupe l'équivalent d'un cube de 0,35 nanomètre d'arête.

On ne doute pas que les techniques de polissage permettent d'arranger les molécules de surface à des échelles aussi petites. Toutefois on a considéré intuitivement que les plus petits défauts élémentaires accessibles à la mesure et intéressants à évaluer car corrigibles par le travail de l'opticien étaient de l'ordre de cette valeur.

On a retenu une hauteur de 0,5 nanomètre de verre, soit 1 nm sur l'onde ou environ $\lambda / 500$.

4.3. ÉTENDUE DES PLUS PETITS DÉFAUTS

En vision photopique, l'œil moyen est capable de détecter sans peine des points de 2 minutes d'angle s'ils ont un très bon contraste, soit 1,5 mm sur un miroir placé à 2500 mm. Pour des figures de points aléatoires et à faible contraste, l'œil a plutôt une résolution de 4 minutes d'angles. Mais pour détecter la présence de défauts par rapport à l'absence on peut garder la limite de 2 minutes d'angle.

Un capteur d'appareil photographique numérique de plus de 4 millions de pixels permet de produire une image du miroir de 800 points de large. Avec un téléobjectif d'au moins 10 mm d'ouverture observant un miroir de 250 mm de diamètre placé à 2500 mm il peut permettre d'analyser le contraste de chaque point. Le défaut élémentaire analysable fait donc de l'ordre de 0,3 mm de diamètre.

On a retenu une étendue de défaut de 0,5 mm pour un miroir de 250 mm placé à 2500 mm.

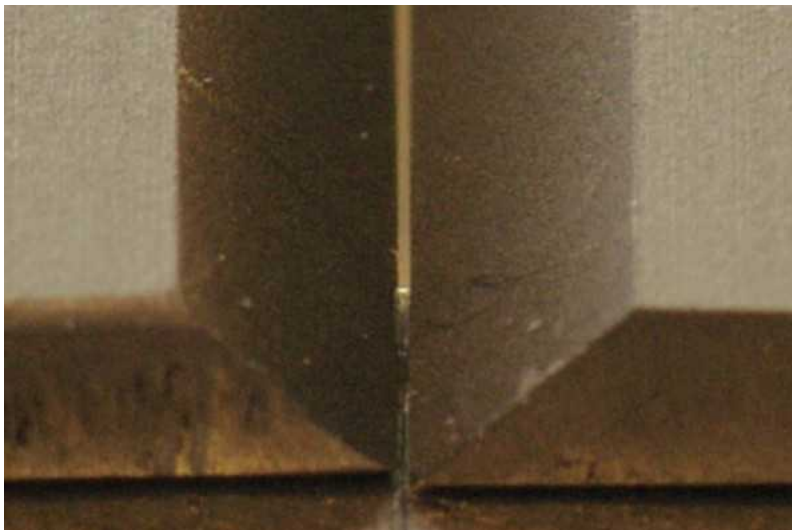
Il n'est pas totalement exclu de pouvoir détecter des défauts plus petits attendu que ceux-ci diffusent de la lumière très largement. Ils peuvent donc produire une saturation d'un point de l'image même s'il ne couvre pas sa surface. C'est le cas des poussières et rayures. Mais dans ce cas on n'est plus dans le domaine où il est possible d'analyser le contraste. Ces points de l'image doivent donc être traités autrement.

4.4. MONTAGE D'ESSAIS

Photographie des différentes fentes utilisées.



Détail de la réalisation de la fente de 60 μm. Elle est taillée dans de l'aluminium de 1,5 mm en suivant les indications du livre de Texereau. Le parallélisme est réglé sous microscope avec un oculaire gradué. La largeur est mesurée par diffraction laser à +/- 2 μm.



Photographie de l'appareil de Foucault.

En attente...

L'intensité et l'uniformité de l'éclairage du miroir peuvent influencer l'analyse des contrastes des résultats. On a veillé à l'uniformité de l'éclairage sur la surface du miroir et à ce que la source lumineuse soit bien diffusante.

Détail de réalisation d'une source diffusante :

On utilise de plus en plus des diodes électroluminescentes blanches et de puissance pour réaliser la lampe des appareils de Foucault. Dans la diode, la source est étendue sur environ 1 mm. Elle est bien diffusante.

L'enveloppe plastique de la diode est en forme de demi-sphère et sert de lentille pour concentrer la lumière dans un cône étroit. L'optique élémentaire nous enseigne que pour réduire la taille du cône, il faut que la source soit au foyer de la lentille. Comme les faisceaux de ces diodes sont assez pincés, la lentille projette donc l'image de la source au loin.

On n'est donc plus du tout semblable à la technique antérieure d'un filament d'ampoule diffusant dans tout l'espace.

Or on a observé que les deux fils d'alimentation, internes à la diode, passent devant la source lumineuse et sont projetés par la lentille plastique à l'avant de la diode. L'ombre de ces fils se retrouve sur les images photographiées au Foucault. On a même observé que l'ombre projetée variait selon que les fils étaient parallèles à la fente ou orthogonaux. Ce qui est conforme à la théorie...

Pour uniformiser l'éclairage du miroir avec une diode de forte puissance, il faut donc limer la demi-sphère qui fait office de lentille à l'avant de la diode. Un papier de verre 600 à l'eau donne une surface légèrement diffusante. Une finition avec un morceau de glace dépolie au W4 donne une surface presque lisse.

On perd en luminosité car la lumière n'est plus concentrée dans un cône. On perd aussi en uniformité d'éclairage sur la hauteur de la fente. Certains considèrent que c'est un avantage de ne pas avoir une fente source longue ou trop haute. Mais surtout on gagne en uniformité d'éclairage du miroir. Il n'y a plus d'ombre sur les photographies.

4.5. EXEMPLES DE LAMES DE PHASE

Photographie des lames de phase des premiers essais à la suie.

En attente...

Photographie de l'image de la fente du Foucault au travers de la lame de phase.

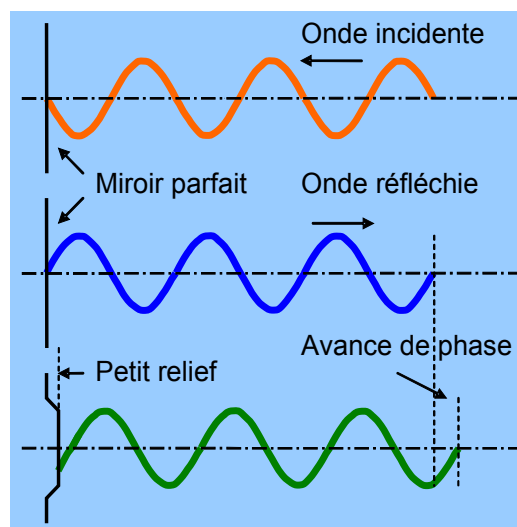
En attente...

La décomposition de l'onde d'un petit défaut

4.5.1. EXPLICATION ILLUSTRÉE POUR UN DÉFAUT EN RELIEF DE 10 NM

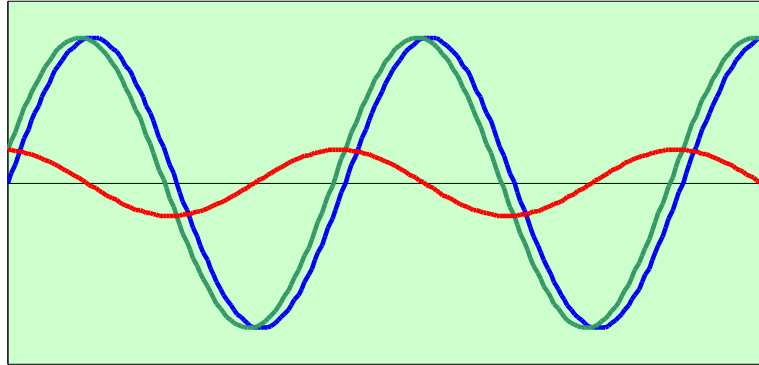
On considère un relief de 10 nanomètres. Il est bien inférieur à la longueur d'onde de la lumière de 550 nanomètres.

La figure suivante rappelle que l'onde réfléchie par un petit relief sur un miroir se trouve en avance de phase par rapport aux autres rayonnements réfléchis par le miroir. La figure présente un miroir plan, mais le raisonnement est transposable aux miroirs sphériques et paraboliques.



On s'intéresse à l'onde réfléchie par le défaut. La théorie ondulatoire permet de la décomposer en deux ondes. La figure suivante montre la décomposition de l'onde du défaut (en vert) selon deux autres ondes (en bleu et rouge). L'addition (rouge et bleu) donne bien l'onde initiale (vert).

- **En vert, l'onde émise par le défaut.** Elle est en avance de $20/550$ cycle ou $0,23$ radian puisque le défaut est en relief de 10 nanomètres.
- **En bleu, l'onde qui serait émise par un miroir sans défaut.** Elle est en phase avec toutes les autres ondes du miroir parfait sphérique.
- **En rouge, la différence des ondes :** C'est l'onde qu'il faut ajouter à la bleu pour retrouver la verte. C'est l'onde propre au défaut selon cette décomposition. Elle est bien en avance d'environ un quart d'onde par rapport à l'onde du miroir parfait. Cette approximation est d'autant meilleure que le défaut est de faible hauteur. Pour 10 nanomètres elle fait $0,23$ de la hauteur de l'onde incidente.



4.5.2. EXPLICATION MATHÉMATIQUE SIMPLE ET DÉTAILLÉE

On peut mathématiquement traiter les ondes par une formulation en exponentielle complexe ou en trigonométrie. C'est cette deuxième voie qui est retenue pour ce paragraphe. La première voie sera préférée aux paragraphes suivants.

Onde de référence d'un élément de surface du miroir parfait : $I_0 \sin(\omega t)$

Onde passant par un petit défaut de surface égale : $I_0 \sin(\omega t + \varphi)$

Le déphasage est positif pour un relief et négatif pour un creux. Le déphasage est très petit et l'intensité est la même tant que le défaut est aussi réfléchissant que le reste du miroir.

On applique le développement du sinus : $\sin(a + b) = \sin(a)\cos(b) + \cos(a)\sin(b)$

L'onde du défaut est donc décomposable en : $\sin(\omega t)\cos(\varphi) + \cos(\omega t)\sin(\varphi)$

Comme φ est très petit, on peut réduire par : $\cos(\varphi) \cong 1$ et $\sin(\varphi) \cong \varphi$

Il faut aussi rapporter le sinus en cosinus par : $\cos(\omega t) = \sin(\omega t + \frac{\pi}{4})$

Finalement l'onde du défaut est décomposable selon : $I_0 \sin(\omega t) + I_0 \varphi \cdot \sin(\omega t + \frac{\pi}{4})$

On peut donc décomposer l'onde passant par un petit défaut en relief en une onde semblable à l'onde du miroir parfait plus une onde de petite intensité déphasée en avance de π sur quatre. C'est le principe de la méthode du contraste de phase imaginée par Zernicke : Transformer les petites variations de phase en variations d'intensité.

Il reste à pouvoir séparer ses ondes pour les exploiter.

4.6. LA DIFFRACTION

La diffraction existe sur toutes les images même avec des optiques parfaites. Il y en a sur l'image de la fente du Foucault. C'est le même phénomène qui produit l'image de diffraction des étoiles observées à fort grossissement. Elles s'expliquent par la théorie de la diffraction. On les calcule par les transformations de Fourier.

Pour une fente fine ou un petit point placé au centre de courbure d'un miroir sphérique, on attend que la taille de l'image et l'espacement des franges de diffraction soient donnés par :

$$1,22.\lambda R / D = 2.44 \lambda F/D$$

Avec

- λ (lambda) la longueur d'onde de la lumière typiquement prise à 550 nm à moins que l'éclairage du Foucault soit rouge ou bleu.
- R le rayon de courbure du miroir et F sa focale
- D le diamètre du miroir

Le tableau suivant donne l'interfrange des défauts qui nous intéressent. Il essaye de montrer la sensibilité de ce phénomène selon le type de miroir.

| <i>Interfranges (ou rayon d'Airy) des défauts types</i> | 150 mm Sphérique F/8 | 250 mm Parabolique F/5 | 400 mm Parabolique F/4,5 |
|---|-------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| Tout le miroir | 10,7 μm | 6,7 μm | 6,0 μm |
| Portion de D/10 mm | 107 μm | 67 μm | 60 μm |
| Défaut visuel de 2 minutes d'angle | 1,1 mm | 1,1 mm | 1,2mm |
| Défaut photographique 0,5 mm | 3,2 mm | 3,4 mm | 4,8 mm |

La diffraction existe aussi sur les optiques qui ne sont pas parfaites. C'est particulièrement le cas des optiques poussiéreuses. La poussière diffuse de la lumière dans toutes les directions au lieu de la réfléchir dans une direction particulière.

On n'observe pas directement les franges de diffraction de l'image de la fente dans ce test. Le calcul ci-dessus ne sert qu'à donner des ordres de grandeurs des phénomènes diffractifs qui vont nous intéresser plus loin.

4.7. L'ABERRATION DE SPHÉRICITÉ

Les miroirs étant le plus souvent parabolique et observé avec un Foucault depuis leur centre de courbure, toutes les surfaces du miroir ne focalisent pas au même point. Il a donc étalement du faisceau dans le plan image.

Le tableau suivant donne la demi-largeur de l'aberration à son minimum géométrique. Une analyse plus fine tenant compte des franges de diffractions devra être faite.

À vérifier...

| <i>Aberration de sphéricité minimale au centre de courbure</i> | 150 mm Sphérique F/8 | 250 mm Parabolique F/5 | 400 mm Parabolique F/4,5 |
|--|-------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| Demi-largeur | 0 | 0,31 mm | 1,23 mm |

Cet étalement va obliger à élargir le trait dépôt de la lame pour ne pas être ébloui par les zones non masquées.

À dessiner...

Le faisceau de référence

Explication interférométrique à développer...

L'ensemble des points de la surface du miroir contribuent à produire l'image de la fente. Si l'on avait un miroir de diamètre infini et sans défaut de surface, on aurait une image parfaite de la fente sans frange de diffraction autour. Avec un miroir réel si l'on pouvait isoler l'image de la fente des franges de diffraction qui l'accompagnent, on obtiendrait une onde sphérique de référence sans aucune information sur la surface du miroir ni sur les défauts de la surface du miroir. C'est ce que fait le dépôt sur la lame de phase. La partie des ondes qui correspondent à une surface de miroir moyen est isolée, atténuée et déphasée. Elle sert ensuite d'onde de référence pour la figure d'interférence.

4.8. L'ATTÉNUATION DE LA LAME

L'atténuation du faisceau est indispensable car les franges latérales de l'image comme les rayons diffractés par les défauts sont de faible intensité. L'atténuation évite de noyer l'image d'interférence dans la luminosité de l'image de la fente.

Il se trouve que le phénomène physique qui atténue provoque aussi le déphasage. Voir plus loin.

La valeur de l'atténuation nécessaire est discutée avec la mise en équation de la visibilité des défauts.

4.9. LE DÉPHASAGE DANS LA LAME

Le déphasage de l'onde lors de la traversée de la lame de phase n'est pas clair pour moi. Je ne l'expliquerai donc pas. Certains auteurs expliquent, avec les mains, que l'atténuation est faite par la présence de micro sphères opaques sur le trajet des rayons. Comme la lumière doit trouver son chemin entre les sphères, son trajet est plus long et conduit à un déphasage.

Mais l'explication physique nécessite de revenir à la propagation des ondes dans les milieux métalliques ou opaques, et de mettre en équation une sorte d'effet tunnel aussi nommé onde évanescente. On découvre alors que l'indice de réfraction peut être complexe et que tout cela n'est pas facilement accessible...

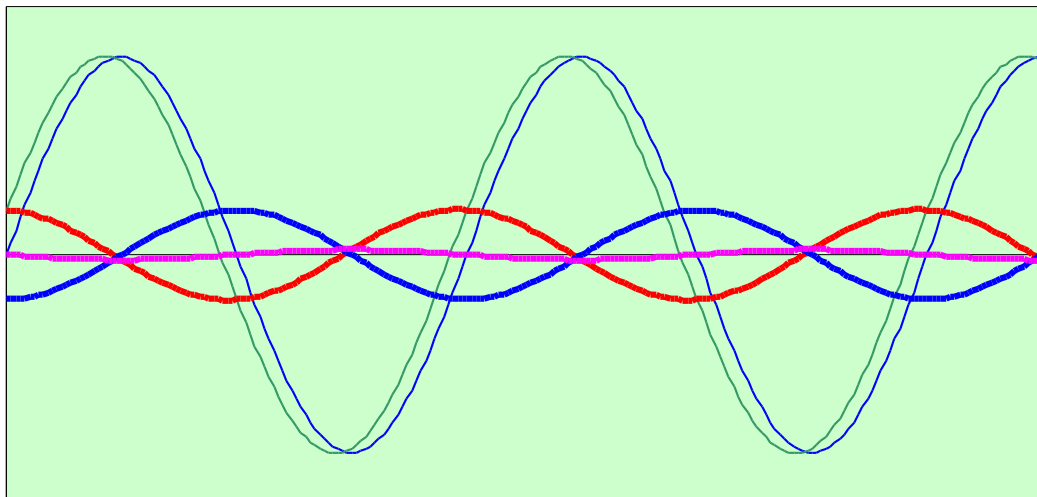
Mais ce sera développé ici, un jour...

Le déphasage du faisceau de référence est à l'origine du phénomène d'interférence recherché.

4.10. LE FAISCEAU DE TEST

Chaque élément de la surface du miroir se comporte comme un émetteur de lumière selon la théorie ondulatoire ébauchée par Huygens puis finalisée par Fresnel en 1808. L'onde réémise par un élément de surface arrive donc sur la lame de phase comme une onde sphérique provenant d'un point de la surface du miroir. On s'intéresse maintenant à la partie de cette onde qui passe à côté du dépôt.

...



4.11. MISE EN ÉQUATION DU CONTRASTE DES DÉFAUTS

La mise en équation du contraste de phase a été faite par Zernike en 1934 en même temps que celle du test du couteau encore nommé : test de Foucault. Voir les articles en référence. Cette mise en équation a été reprise par Lyot et se trouve citée par Texereau dans ses livres et articles. Le développement complet de cette théorie est fort long (14 pages) et sort du cadre du présent article. Il fait l'objet d'un article à part.

Le développement suivant donne une approximation suffisante même si elle ne considère pas ce qui se passe au niveau des franges de diffraction de l'image de la fente, ne considère pas l'obstruction des rayonnements diffractés par la lame de phase et ne traite pas l'étalement de l'image par l'aberration sphérique des miroir paraboliques.

Onde de référence venant d'un élément de surface parfait : $I_0 \cdot \exp i \omega t$

Lame de phase de densité D : $D = \log\left(\frac{1}{a^2}\right)$ et induisant un retard de λ sur 4. L'onde

de référence émergeant de la lame de phase est donc : $I_0 \cdot a \cdot \exp i(\omega t - \pi / 2)$

Compte tenu que l'image est constituée par un système optique, l'intensité lumineuse I_0 venant de chaque point du miroir est intégrée et conduit à un éclairage de chaque point de l'image du miroir qui sera notée B_0 . L'éclairage passant par la lame de phase est donc : $B_0 \cdot a^2$

L'onde revenant d'un défaut de petite hauteur h : $I_0 \cdot \exp i(\omega t + 2h \cdot 2\pi / \lambda)$

Elle se décompose en deux parties. Une fait partie de l'onde de référence et l'autre nous intéresse car elle passe autour de la lame de phase. Elle s'exprime par : $I_0 \cdot \frac{4\pi h}{\lambda} i \cdot \exp(i \omega t)$

Donc l'intensité de l'interférence est donnée par : $B_0 \cdot \left| ai + \frac{4\pi h}{\lambda} i \right|^2$

On notera qu'il est certes très plaisant de faire tenir les 14 pages du développement de Zernike en quelques lignes, mais qu'il ne faut pas oublier que ce n'est qu'une approximation.

On retrouve le résultat présenté par Texereau selon Lyot en développant le carré puisque h est petit devant la longueur d'onde:

$$B_0 \cdot \left| ai + \frac{4\pi h}{\lambda} i \right|^2 \approx B_0 \cdot a^2 \left[1 + \frac{8\pi h}{\lambda a} \right]$$

Mais il y a une différence puisque Texereau et Lyot donnent l'intensité de l'interférence par:

$$I = \frac{A^2}{N} \left(1 + \frac{4\pi x \sqrt{N}}{\lambda} \right) \text{ avec } N \text{ l'absorption et une notation différente de l'éclairage.}$$

Pour expliquer cette différence, on peut supposer que Lyot avait construit une lame de phase couvrant un demi plan plutôt que seulement l'image de la fente d'éclairage. Dans ce cas effectivement on a seulement la moitié de l'intensité diffractée par les défauts qui participe à l'interférence.

Le tableau suivant montre l'effet de l'approximation qui n'est plus négligeable pour les très fortes atténuations et pour les gros défauts. La formule rigoureuse, qui n'est pas plus difficile à calculer, est donc préférable.

Intensité de l'interférence relativement au fond uniforme d'un miroir parfait:

| Densité optique de la lame | 0 | 0,5 | 1 | 1,5 | 2 | 2,5 | 3 |
|---|------|------|------|------|------|------|------|
| <i>Cas du défaut de 0,5 nm de hauteur</i> | | | | | | | |
| Intensité exacte | 1,02 | 1,04 | 1,07 | 1,13 | 1,24 | 1,45 | 1,85 |
| Intensité approchée | 1,01 | 1,04 | 1,07 | 1,13 | 1,23 | 1,41 | 1,72 |

| Cas d'un défaut de 5 nm de haut | | | | | | | |
|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Intensité exacte | 1,24 | 1,45 | 1,85 | 2,7 | 4,6 | 9,2 | 21,3 |
| Intensité approchée | 1,11 | 1,20 | 1,36 | 1,64 | 2,14 | 3,03 | 4,6 |

Ce tableau de calcul montre que pour les poussières inévitables, qui font de l'ordre de 10 nm et plus, on va obtenir une intensité très forte liée exclusivement au phénomène diffractif. On ne se trouve plus dans le cadre du contraste de phase et de l'interférence de deux faisceaux d'intensité semblable.

4.12. L'OPTIMISATION DU MONTAGE

L'atténuation du faisceau dans la lame va améliorer la visibilité des petits défauts en donnant plus de poids aux rayons diffractés loin du centre, mais va conduire à une image plus difficile à observer par sa faible luminosité. Certains auteurs conseillent une lame transmettant 5% de la lumière, soit une densité de 1,3. Texereau mentionne des lames de densité 1,69 à 2,81 donc transmettant de 2,0% à 0,15%. La formule théorique ci-dessus montre que l'augmentation de la sensibilité est proportionnelle à la racine de la densité de la lame atténuante.

Pratiquement en passant d'une lame de densité 1 à 2 on perd un facteur 10 sur la luminosité du miroir parfait et l'intensité lumineuse de l'interférence n'est multiplié que par 3,2 relativement au gris du miroir parfait.

Le tableau suivant calcule le contraste visuelle en considérant deux défauts de même amplitude totale de 0,5 et 5 nanomètres, mais réparti en creux et en bosse par rapport au niveau du miroir parfait. Il montre que le contraste visuelle est multiplié par environs trois pour une densité de plus.

Contraste visuelle des niveaux de gris d'un défaut symétrique par rapport au miroir parfait :

| | | | | | | | | |
|------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|
| Densité optique de la lame | 0 | 0,5 | 1 | 1,5 | 2 | 2,5 | 3 | 3,5 |
| Contraste défaut +/- 0,25 nm | 1% | 2% | 4% | 6% | 11% | 20% | 35% | 58% |
| Contraste défaut +/- 2,5 nm | 11% | 20% | 35% | 58% | 86% | 100% | | |

Donc l'atténuation va faire baisser la luminosité plus vite qu'elle ne va augmenter le contraste. Il faut trouver le bon compromis de visibilité.

4.13. LES DIFFICULTÉS PROPRES AUX MIROIRS PARABOLIQUES

Il y a un problème du fait de l'aberration de sphéricité qui étale l'image de la fente au centre de courbure du Foucault. Personne n'en parle. Mais cela empêche de profiter des diffractions de faibles angles. Comment faire pour contrôler les plus gros défauts alors?

...

4.14. VISIBILITÉ DES PLUS GROS DÉFAUTS

Est-ce bien du contraste de phase ou est-ce un reliquat de Foucault... ?

Réfléchir sur ce qui explique pourquoi ne voit-on pas le mamelonnage ni les aberrations de l'ordre du lambda?

5. RÉALISATION

5.1. FABRICATION DE LA LAME DE PHASE À LA SUIE

Se procurer une **lame de verre de microscope** ou de support de diapositive.

Passer plusieurs fois le verre dans la pointe de la flamme d'une bougie. Cela procure un dépôt étalé et plus ou moins homogène de suie. Un peu de pratique permet d'uniformiser le dépôt.

Racler la suie pour obtenir une limite franche et droite. L'extrémité d'une allumette taillée en biseau est une gomme idéale pour cela. Certains utilisent un racloir en lame de rasoir et d'autres fixent une lame de rasoir sur la lame de verre avant de passer à la flamme pour obtenir directement le trait.

Une surface d'environ 5 mm de large sur 10 à 20 mm de haut est parfaite.

Certains auteurs expliquent comment réaliser une lame de phase en forme de trait juste assez large pour masquer l'image de la fente. Cela est certainement facile avec la technique de la pellicule photographique. Mais il est assez difficile de maîtriser la largeur d'un trait très mince avec la suie raclée manuellement.

Un trait adapté à la largeur de la fente du Foucault n'est pas indispensable ni pratique. Lorsqu'il faut utiliser la même lame sur plusieurs Foucault, aux fentes plus ou moins larges et de hauteurs variables, sur différents miroirs paraboliques aux aberrations de sphéricité plus ou moins prononcées ; il est plus commode d'avoir un demi plan plutôt qu'une collection de traits plus ou moins larges. D'autant plus qu'il n'est pas inutile de disposer de plusieurs densités.

N.B. : Lorsque la lame à la forme d'un demi plan, la formule du contraste est donnée par Texereau et Lyot. Les valeurs de contraste données dans les tableaux ci-dessus sont à diviser par 2.

5.2. CARACTÉRISATION DE LA LAME

5.2.1. BESOIN

Il n'est pas indispensable de mesurer l'atténuation et le déphasage du dépôt de la lame. Le test peut rester qualitatif s'il se contente de détecter des défauts anormaux ou s'il vise à suivre les progrès du travail de polissage.

Mais encore faut-il être certain que la lame permet de voir des défauts et quels types de défauts...

Et pour arriver à une quantification de la hauteur des défauts mis en évidence, il faut au minimum connaître la densité et le déphasage du dépôt. Pour les miroirs paraboliques, il faut aussi s'assurer des effets des franges de diffraction de l'image de la fente et des effets des aberrations de sphéricité. Il faut donc qualifier la largeur du trait par rapport aux caractéristiques du miroir.

5.2.2. MESURE DE LA DENSITÉ

La mesure peut être faite de différente manière :

Avec un montage à base de cellule photoélectrique :

Placer une lampe derrière une fente plus étroite que la lame de phase. Typiquement la fente du Foucault. Mettre une cellule photoélectrique devant. Par exemple un semi-conducteur à base de sulfure de cadmium (CdS). Mettre la pièce dans le noir. Mesurer la résistance de la cellule. Insérer la lame de phase devant la fente. Comparer la résistance et convertir en facteur d'atténuation en faisant le ratio

En comparant la densité avec des mires étalonnées :

Se procurer des filtres photographiques de densités dégradées. Il faut qu'ils soient transparents. On trouve cela dans les laboratoires photo professionnels. Les gélatines filtres gris neutre de Kodak Wratten peuvent aussi être utilisés.

En relevant les temps de pose avec un appareil photo :

Photographier le miroir lors d'un test de Foucault sans le couteau. Noter le temps de pose et l'ouverture. Faire de même avec la lame de phase masquant largement l'image de la fente. C'est aussi pour cela qu'il est intéressant d'avoir un demi plan. Un trait laisserait passer une partie des franges latérales. Il faut vérifier que l'on arrive à un gris moyen uniforme sur les deux images. Sans quoi la mesure est faussée par les courbes de réponse. Celles des appareils numériques ou des pellicules n'ont rien de linéaires. Il est commode de le vérifier sur l'image avec un appareil photo numérique. Rapporter les résultats en temps de pose à diaphragme égal en tenant compte de la progression géométrique des diaphragmes... Et faire le ratio.

5.2.3. MESURE DU DÉPHASAGE

Contrôler le déphasage induit par la lame n'est pas trivial. On ne trouve qu'un auteur sur la toile qui présente une technique de mesure à base d'interféromètre.

A faire, essayer puis développer ici...

5.3. MODE OPÉRATOIRE

La mise en place est identique au test de Foucault. On remplace le couteau par la lame de phase. Il faut une source lumineuse plus intense que pour un test de Foucault sur miroir non aluminé.

Certains auteurs conseillent une fente large pour avoir plus de lumière. Mais on ne trouve pas de justification rigoureuse de la largeur requise. J'ai utilisé des fentes larges sans voir de différence avec les plus fines... A développer...

Pour les miroirs paraboliques, il faut se placer au minimum d'aberration. Il est facile de s'y placer en utilisant la lame de phase comme d'un couteau de Foucault.

La lame de phase est de forte densité. Elle joue le rôle du couteau de Foucault. Tant que l'image n'est pas occultée, l'intensité lumineuse est telle que l'œil ne perçoit que les zones d'ombre et de lumière usuelle du Foucault. C'est seulement lorsque l'image est occultée que l'œil s'adapte et perçoit l'image de contraste de phase.

La position requise est celle du couteau coupant les rayons provenant de la zone à 70% du rayon du miroir. Dans cette position les premières franges de diffraction de l'image venant de 70% du rayon sont confondues avec l'image de la fente arrivant du centre et du bord du miroir. On perd donc une partie de la résolution du test.

Il faut veiller au parallélisme de l'image et de la lame. Cela se fait bien car on peut voir l'image atténuée de la fente au travers de la lame.

Il faut juste couper l'image avec la lame de phase pour faire disparaître l'image de la fente.

C'est au moment où la figure de zones d'ombre et de lumière du Foucault disparaît et pas plus. C'est là que l'on bénéficie du plus de lumière diffractée par les défauts et en particulier de la lumière des grands défauts qui diffractent moins largement. Et là on peut voir l'image de contraste de phase.

Lorsque l'on dispose d'une lame de phase en forme de trait mince, on peut pousser plus ou moins la lame et voir l'effet sur la figure. On observe que la zone où les plus gros défauts sont visibles varie avec la position de la lame.

Quand on est à cette position le test donne le maximum de bande passante.

On observe des détails de différentes tailles sur le miroir, les plus étendus étant les plus petits visibles au test de Foucault comme le micro mamelonnage. Mais à mesure que l'on pousse la lame de phase, les défauts à diffraction étroite voient leur lumière passer intégralement par le dépôt de la lame de phase. Les détails les plus étendus disparaissent et ne subsistent que les petits.

Avec un miroir parabolique, la bande passante varie à la surface du miroir. Si l'on se place au minimum d'aberration, les détails les plus gros sont visibles seulement au bord et au centre du miroir.

Avec une lame de phase en demi plan, les détails les plus gros ne sont visibles que d'un seul côté de l'image. Il faut inverser la lame pour les voir sur l'autre moitié.

Parfois, l'œil n'a pas une pupille assez grande ou n'est pas assez sensible pour voir les détails.

Trois actions sont possibles : Augmenter la source lumineuse, se mettre dans le noir pour profiter d'une plus grande ouverture de l'œil qui collectera plus de lumières diffractées ou profiter du temps de pause et du diamètre d'objectif d'un appareil photographique.

C'est la photographie qui donne les meilleurs résultats

La photographie augmente la résolution de l'image et avec un objectif sérieux permet de collecter les diffractions sur un plus large diamètre.

6. RÉSULTATS

6.1. EFFET DE LA TECHNIQUE DE POLISSAGE SUR LES DÉFAUTS DE SURFACE

6.1.1. LIMINAIRE

Il n'est pas douteux que les matériaux impliqués dans le polissage du verre (poix, zirconium, cérium, opaline, eau, etc.) ni que la technique de polissage elle-même (forme de l'outil, texture de l'outil, vitesse de travail, pression, etc.) influencent les défauts de surface. Il semble même que

l'essentiel des défauts de l'ordre du nanomètre, accessible au test du contraste de phase, soit exclusivement due aux matériaux et techniques de polissage.

Il faut voir à ce sujet l'article de Texereau de 1950. C'est le seul trouvé en français. Il compare utilement différentes techniques de polissage. Il ne comporte hélas pas les dernières techniques de polissage (poix synthétiques, mélanges d'oxyde SRS, silice colloïdale, polissage à l'eau, etc.) non plus qu'il n'analyse ce qui soucie certains amateurs comme la dureté de la poix.

Il existe une abondante publication professionnelle anglo-saxonne sur le sujet.

À développer ...

Les exemples suivants illustrent quelques cas typiques. Ils ont tous été photographiés sur le même dispositif comportant :

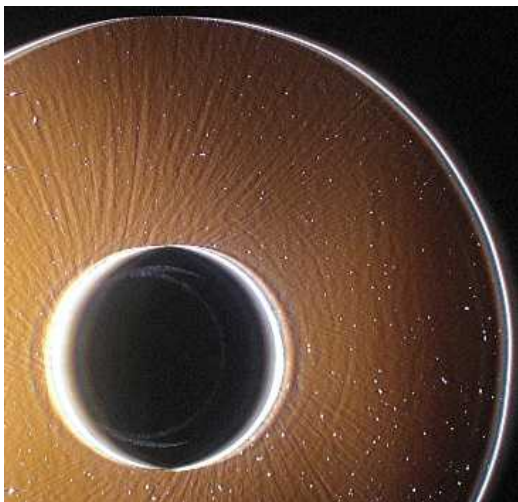
- Une diode électroluminescente blanche de forte puissance
- Une fente de 120 μm sur 5 mm
- Des miroirs aluminés protégés sauf mention contraire
- Une lame de phase à la suite de densité xxx et de déphasage xxx sauf mention contraire
- Un appareil photographique numérique d'ouverture xx mm

6.1.2. MIROIR SPHÉRIQUE D'IMPORTATION

Miroir de 94 mm de diamètre doté d'une ouverture de 30 mm. Rayon de courbure de 591 mm. Miroir probablement en Pyrex, aluminé et protégé par de la silice.

Le contraste de phase montre les petits défauts de surface engendrés par le polissage à la machine. Il n'y a pas de mamelonnage visible. Les points blancs sont de la poussière.

L'interférométrie qui révèle un astigmatisme de 0,6 Lambda pic-vallée sur une forme générale sphérique.



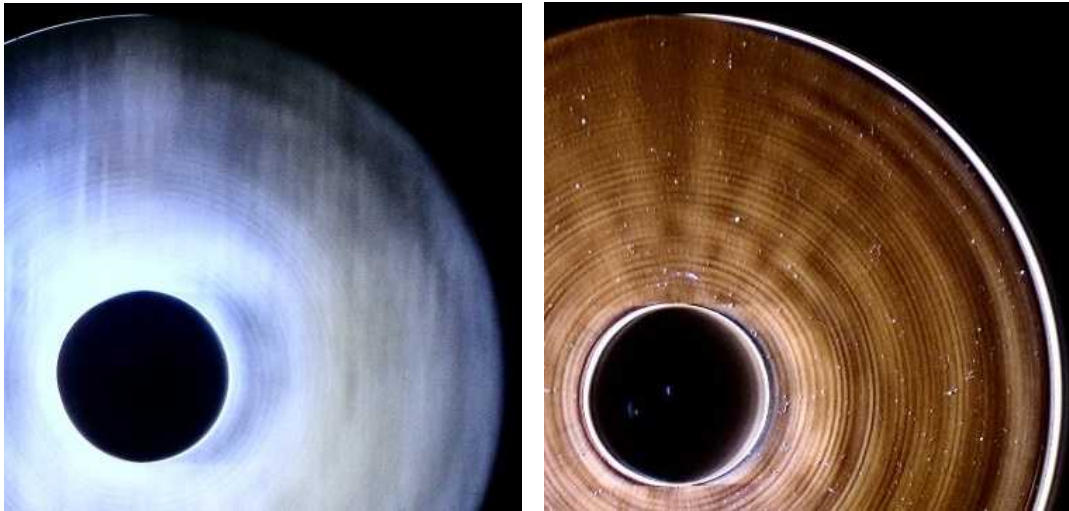
6.1.3. MIROIR SPHÉRIQUE NATIONAL

Miroir sans doute fabriqué en Asie, mais spécifié, contrôlé et intégré dans un instrument distribué par un constructeur Français.

Miroir de 160,2 mm de diamètre optique (161 mm de verre) avec une ouverture centrale de 38 mm de diamètre optique. Miroir sphérique de rayon de courbure de 917 mm. Miroir en Pyrex. Surface aluminée et protégée par une couche de silice.

Le Foucault et le contraste de phase montre la spirale laissée par la meule d'ébauchage (on peut suivre la spire) de même que du zonage et du mamelonnage. Les défauts de surface sont bien plus visibles avec le contraste de phase. En particulier le mamelonnage en éventail n'est pas vu au Foucault. Les points blancs sont de la poussière.

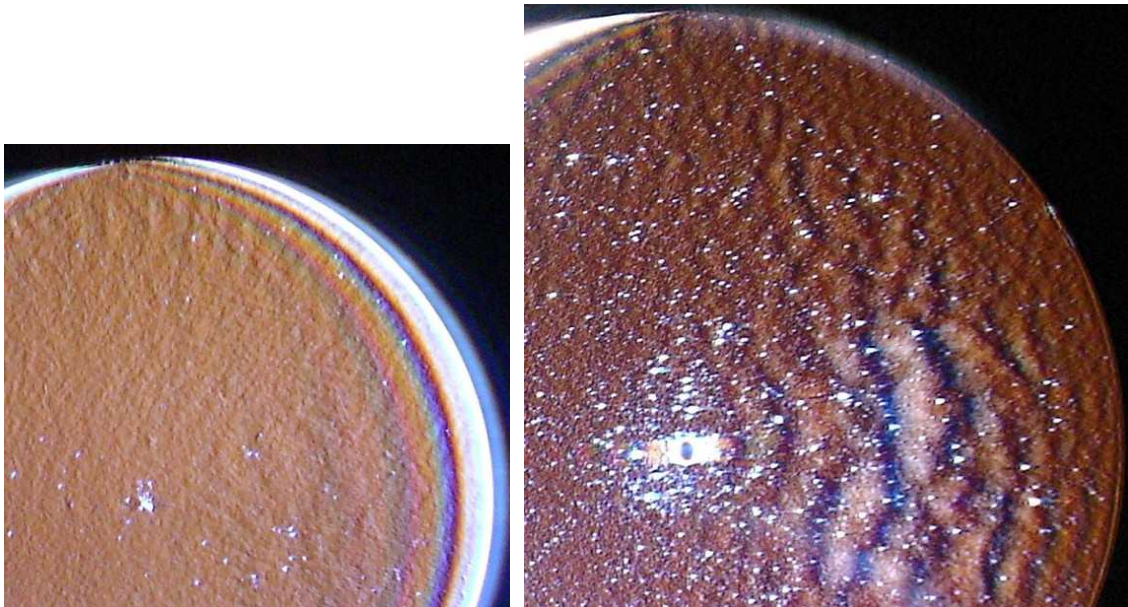
Les mesures à l'interféromètre ont révélé un astigmatisme pic-vallée de trois Lambda partiellement corrigé en dessous de un Lambda par mise en contrainte par le barillet.



Figures obtenues au Foucault et au contraste de phase.

6.1.4. MIROIRS PARABOLIQUES D'AMATEUR TRAVAILLÉ À LA POIX ET À L'OXYDE DE ZYRCONIUM

Miroirs personnels en Pyrex de 202 mm ouvert à 6 à gauche et 254 mm ouvert à 5 à droite.



Sur le 200 mm, le contraste de phase montre un reliquat de mamelonnage et un état surface caractéristique du polissage à la poix. La tache blanche au centre est liée au repère au feutre du centre du miroir. Les points blancs sont des grains de poussière et des traces de postillons. Le croissant blanc périphérique est lié à la largeur de la lame de phase insuffisante pour l'aberration de sphéricité du miroir. L'aluminure est non protégée et récente.

Sur le 250 mm, le contraste de phase montre, en plus de ce qui existe sur le 200 mm, un mamelonnage centimétrique important lié à un polissage trop brutal. Sur cette image, le couteau constitué par la lame de phase est juste assez poussé pour laisser subsister une trace de la figure du Foucault : La nébulosité blanche qui couvre les plus gros mamelonnages.

Cette disposition permet d'observer que c'est juste lorsque la figure du Foucault disparaît que l'on peut observer les défauts les plus étendus. Ces défauts ne sont visibles que sur une forme en demi-lune à droite, là où a disparu la dernière zone éclairée du Foucault.

Le rond blanc étalé au centre est la figure de diffraction de la pastille de papier centrale qui ne réfléchit pas la lumière mais en diffuse. L'aluminure est protégée mais ancienne et en mauvais état.

6.1.5. MIROIR SPHÉRIQUE D'AMATEUR SUPER POLI

Un jour certainement...

En attendant on peut en voir sur le site de la société Astrotélescope:

<http://www.astrotelescope.com/>

6.2. EST-CE QUE C'EST NÉCESSAIRE ?

6.2.1. AVIS DE SUITER

Le livre de SUITER explique qu'une rugosité normale n'a quasiment pas d'effet sur le contraste ou la résolution. Pour lui, l'effet n'est pas plus important que d'avoir de la poussière sur l'optique.

On peut déduire qu'il est inutile de faire du contraste de phase.

6.2.2. DÉMONSTRATION DE LEVAVASSEUR

Didier Levavasseur a montré que des défauts de fréquence spatiale entre 1/100 et 1/10 du diamètre de l'objectif avec un écart type de hauteur au dessus de λ sur 28 (et environ λ sur 8 pic-vallée), avait de l'influence sur la faculté de discerner à l'œil les plus faibles contrastes des images planétaires. Sa démonstration mérite d'être connue car c'est la seule qui soit adaptée à la pratique amateur de l'observation planétaire. Il démontre aussi que les critères de Couder, de Françon, de Maréchal sont peu appropriés pour cette pratique des amateurs.

Donc les défauts de 2,5 à 25 nm de large sur un miroir de 250 et de plus de 10 nanomètres de hauteur vont dégrader significativement la visibilité des faibles contrastes. On est ici dans les défauts millimétriques et centimétriques pour les optiques des amateurs et dans des hauteurs de défauts tout à fait réalistes et observables sur les miroirs amateurs.

Il est donc intéressant de vérifier au moins les défauts millimétriques par contraste de phase. Il serait aussi intéressant de rechercher les défauts centimétriques, mais ceux-ci sont moins faciles à bien mettre en évidence par contraste de phase sur des miroirs paraboliques.

6.2.3. L'AVIS DES CLIENTS D'ASTROTÉLESCOPE

Les amateurs qui utilisent les optiques dites super polies de Jean-Marc Leclaire voient la différence en particulier sur les couleurs et les détails de faible contraste en visuel et en imagerie planétaire. Ils attribuent généralement cet effet au super poli. Mais pour être rigoureux, une surface sans mamelonnage centimétrique peut aussi contribuer à cet effet.

Sans pouvoir tirer des certitudes, on peut constater un faisceau de cohérence : Ce constructeur utilise le contraste de phase pour contrôler les défauts de petite taille. Les optiques pour lesquels il met en œuvre cette technique sont meilleures sur les images planétaires de faible contraste et pour lesquelles une surface très peu diffusante est nécessaire.

6.2.4. CONCLUSION (EN ATTENDANT QUE D'AUTRES ESSAIS ET ÉTUDES SOIENT MENÉS)

On peut tenter de conclure *a minima* et sans aucune base théorique. Car dans la recherche de la perfection il est tout simplement raisonnable d'avoir un moyen de vérifier tous les défauts possibles. Ne pas avoir de moyens de contrôles des petits défauts de surface, c'est prendre le risque d'en avoir trop. Et donc, **dans la quête de la qualité, il est raisonnable d'utiliser le contraste de phase**. Dans ce cadre on pourrait se contenter d'une utilisation qualitative.

Depuis peu, grâce aux études théoriques de Didier Levavasseur, on sait que pour l'observation planétaire, il faut maîtriser l'amplitude des petits défauts de surface. On retrouve les conclusions de Bernard Lyot pour les coronographes mais transposées à l'observation planétaire. Or la technique du contraste de phase est la seule qui donne accès aux défauts d'étendue millimétrique et de hauteur nanométrique. **Donc pour un instrument dédié au planétaire il est nécessaire d'utiliser le contraste de phase**. Dans ce cadre il faudrait des mesures quantifiables. Elles restent à développer, peut-être par des traitements d'images avec plusieurs densités de lames afin d'approcher une valeur d'écart type.

Enfin je peux assurer qu'il est fort gratifiant de montrer à ses amis sa maîtrise du nanomètre.