

**Zeitschrift:** Orion : Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft  
**Herausgeber:** Schweizerische Astronomische Gesellschaft  
**Band:** 77 (2019)  
**Heft:** 5

**Artikel:** Comparaison de méthodes de contrôle des miroirs de télescopes.  
2ème partie  
**Autor:** Falco, Lucien  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-960571>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 02.02.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

Petite étude compare expérimentalement (2ème Partie)

# Comparaison de méthodes de contrôle des miroirs de télescopes

**Tous les amateurs tailleurs de miroirs de télescopes connaissent la méthode de Foucault pour effectuer le contrôle optique des surfaces paraboliques. Avec l'évolution des technologies, l'arrivée des lasers et des caméras numériques, cette méthode a pu être modernisée et de nouvelles techniques, comme l'interférométrie, sont désormais à la portée des amateurs. Cette petite étude compare expérimentalement diverses méthodes de mesure appliquées à un miroir taillé par l'auteur.**

Dans la première partie, la méthode basée sur la détermination de la pente de la surface (méthode de *Foucault*) a été décrite.

Cette seconde partie examine la mesure directe de la surface par interférométrie ainsi qu'un procédé basé sur l'observation de l'image stellaire défocalisée.

La comparaison de ces méthodes laisse apparaître une certaine différence entre les caractéristiques mesurées, difficilement explicable pour la méthode utilisant l'observation de l'image stellaire défocalisée.

## MÉTHODE INTERFÉROMÉTRIQUE

L'interférométrie est restée longtemps une technique réservée aux professionnels. Ainsi, l'interféromètre de *Michelson* est fréquemment utilisé en métrologie, où il permet par exemple de mesurer de très faibles déplacements. La lumière incidente, généralement issue d'un laser, est séparée en deux branches au moyen d'un miroir séparateur. Une des branches est terminée par un miroir fixe, l'autre par un miroir mobile. Après réflexion et recombinaison, les deux ondes se superposant présentent un déphasage qui est fonction de la différence entre les chemins des deux branches. La translation du miroir mobile fait ainsi apparaître une variation sinusoïdale de l'intensité dans le plan d'observation. Un déplacement d'une demi-

longueur d'onde du miroir mobile provoque un changement de phase de  $2\pi$  radians, soit un saut d'une frange d'interférence. Cet interféromètre permet ainsi de mesurer des faibles déplacements avec une très grande précision.

La mesure d'un miroir concave peut se faire par exemple au moyen d'un interféromètre de *Twyman-Green* [5], mais néces-

site de disposer d'un bras de mesure et d'un bras de référence extrêmement stables, rendant obligatoire l'emploi d'une table optique, hors de portée d'un amateur.

Heureusement, de nouvelles techniques interférométriques ainsi que l'arrivée des pointeurs laser à bas coût ont mis l'interférométrie à portée des amateurs, grâce principalement à une catégorie d'interféromètres

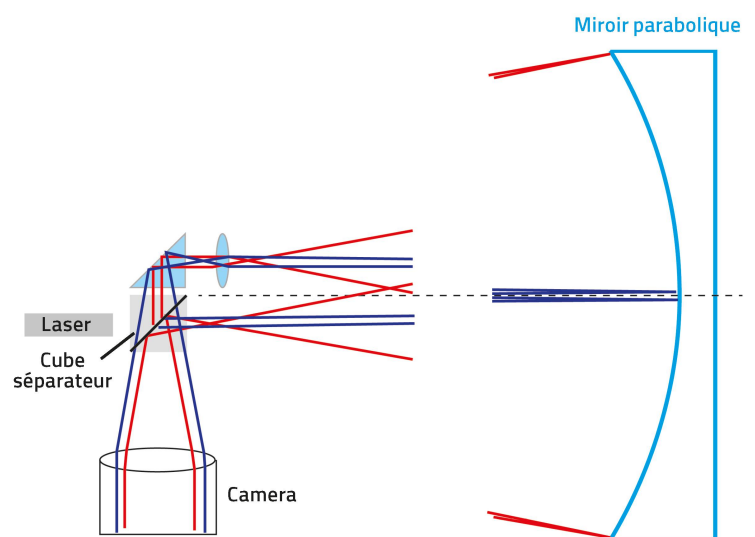


Figure 7:

Principe de l'interféromètre de *Bath*: le faisceau de référence est tracé en bleu, le bras de mesure est tracé en rouge.

Grafik: ORION nach Vorlage

# ATHOS Astrofinca Copernicus

## La Palma · Kanarische Inseln



Das Ferienhaus speziell für 2-3 Amateurastronomen. Wohnzimmer, Schlafzimmer, Küche, Bad, Garten, Terrasse, eigener Beobachtungsplatz. Direkt neben dem ATHOS Star Campus  
Kontakt: [team@athos.org](mailto:team@athos.org) · Tel.-Nr. (Deutschland): +49 172 6966106  
Mehr Infos über die Finca, Miet-Teleskope und Downloads: [www.athos.org](http://www.athos.org)

## Tiefe Sonnenflecken-Minima stehen uns womöglich bevor

Wir erinnern uns noch gut an das ungewöhnlich lange Sonnenflecken-Minimum von 2008/09. Schon damals zeichnete sich ab, dass der 24. Zyklus mit einem Maximum Ende 2013 noch tiefer ausfallen würde als der vorangehende. Dieser Trend soll sich in den kommenden Jahrzehnten fortsetzen, wenn man den Szenarien glaubt, welche die Sonnenforscher zu erkennen glauben. Nach Ansicht vieler Forscher könnte die solare Aktivität in den folgenden Zyklen noch weiter zurückgehen (*de Jager/Duhau 2009, Lean 2010*). Zahlreiche Wissenschaftler erwarten nach dem 24. Zyklus gar eine

länger anhaltende Inaktivität der Sonne, vergleichbar mit dem extremen Maunder-Minimum im 17. Jahrhundert, das bekanntlich mit der Kleinen Eiszeit einherging oder sogar Mitursache dafür war! Die vergangenen Sonnenfleckenzyklen waren im historischen Vergleich allesamt recht hoch. Doch was hätte eine «kalte Sonne» für uns zur Folge? Darüber gibt es äusserst widersprüchliche Meinungen und Ansichten. Es gibt Wissenschaftler, welche der Sonne eine weitaus grössere Wirkung zuschreiben, als dies etwa der IPCC tut, wenn es um die Frage geht, ob die derzeitige Erderwärmung durch eine inaktive Sonne eventuell gebremst oder gar gestoppt werden könnte. Da wir es sowohl in der ganzen Klimadebatte als auch der Sonnenaktivität mit Szenarien (und nicht Prognosen!) zu tun haben, wird sich erst in ein paar Jahrzehnten zeigen, ob und in welchem Mass die schwächelnde Sonne eine Auswirkung auf das globale Klima hat. Alles andere wäre Spekulation und Kaffeesatzleserei.

**Abbildung 1:** Sonnenuntergang über dem Bodensee von der Bödelestrasse aus.

Bild: Thomas Baer





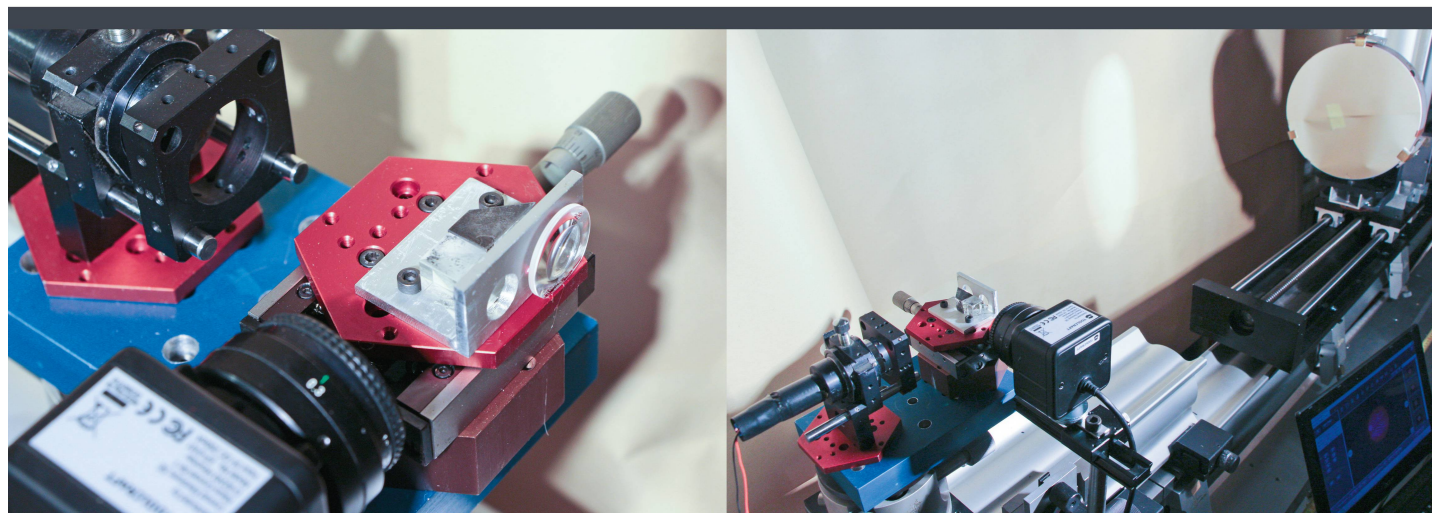


Figure 8: Interféromètre de Bath: tête de mesure (à gauche) et montage complet (à droite).

Image: Lucien Falco

appelée «à bras communs» (common-path interferometer). La solution analysée ici a été proposée par K. Bath en 1973 [6], [7].

Dans son principe, le miroir à mesurer sert à la fois de bras de référence et de bras de mesure, comme schématisé ci-dessous (fig. 7). De cette façon, on s'affranchit du besoin de disposer de deux bras stables et d'un laser à haute cohérence, car les longueurs des deux bras sont ici évidemment identiques. Il ne s'applique cependant qu'à des miroirs sans ouverture centrale; il n'est donc pas possible de mesurer des miroirs Cassegrain avec ce procédé.

Le faisceau issu d'un pointeur laser est divisé par un cube séparateur pour former les deux bras. Le faisceau de référence est dirigé vers le centre du miroir; l'autre, constituant donc le bras de mesure, passe par une lentille pour le faire diverger et illuminer complètement le miroir. Le miroir est placé symétriquement entre les deux bras. Ainsi, après réflexion, le faisceau de référence traverse la lentille alors que le faisceau de mesure est focalisé près de la tête de mesure et entre directement dans le cube séparateur. Après recombinaison, les interférences entre ces deux faisceaux laissent apparaître les écarts entre les deux fronts d'onde. A noter que les aberrations induites par la lentille se compensent puisque les deux ondes, référence et mesure, passent à travers elle. La

condition est que cette lentille soit symétrique (biconvexe symétrique, bille sphérique). Une caméra numérique (webcam), dont l'objectif est réglé pour produire une image nette du miroir, permet d'enregistrer ces interférences. La fig. 8 montre la réalisation de l'interféromètre.

L'ajustement de la distance entre la tête de mesure et le miroir est important: une trop grande défocalisation se traduit par un grand nombre de franges concentriques, rendant l'exploitation des mesures plus difficile. Le nombre de franges de la figure d'interférence peut facilement être modifié en pivotant très légèrement le miroir (fig. 9).

Dans cette réalisation, le pointeur laser a une longueur d'onde de 676 nm, mais tous

les résultats (erreur rms et nombre de *Strehl*) sont convertis pour la longueur d'onde de 550 nm. A noter également l'important «bruit» optique lié aux particules polluantes des surfaces des divers composants. Un «nettoyage» nécessiterait l'introduction d'une filtre spatial, malheureusement pas à disposition. La caméra est identique à celle utilisée pour la méthode de *Foucault*.

Plusieurs logiciels sont disponibles pour le dépouillement de ces images. Des logiciels permettant la reconnaissance automatique des franges existent mais sont très coûteux. Les logiciels libres nécessitent de numériser ces images d'interférence manuellement, en «cliquant» à intervalles réguliers toutes les franges de l'image afin d'en

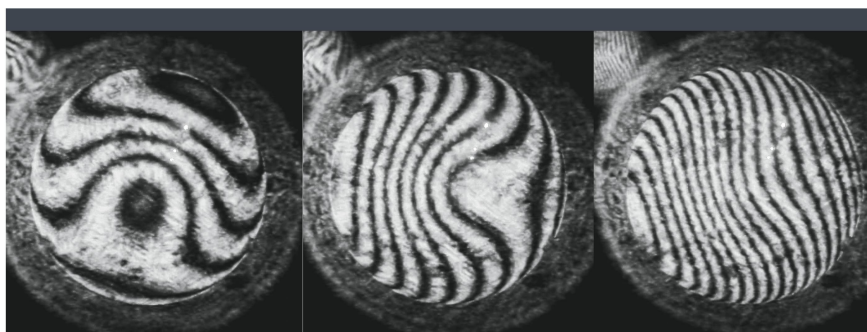


Figure 9: Exemples d'images d'interférence, le miroir est très légèrement pivoté entre les images.

Image: Lucien Falco



repérer leurs positions. Ce travail n'est pas trop fastidieux si l'on ajuste l'interféromètre de façon à produire des images ne comportant que quelques franges, typiquement 5 à 10.

Deux logiciels sont testés ici : FringeXP et OpenFringe. Leur utilisation n'est pas trop pénible car ils possèdent une fonction d'optimisation qui positionne automatiquement les points marqués sur les franges noires au minimum de leur intensité, donc en leur centre; il n'est ainsi pas nécessaire de tracer les franges avec une très grande précision.

Outre les informations de base précédemment citées (coefficient d'asphéricité,

erreur rms, nombre de *Strehl*), ces logiciels fournissent une approximation de la surface sous forme d'un développement en polynômes de *Zernike* [8], [9]. Contrairement à la

méthode de *Foucault*, ils prennent donc aussi en compte des surfaces qui ne sont pas de révolution.

Pour les deux logiciels, les moyennes d'une vingtaine de mesures d'interférogrammes comportant entre 4 et 12 franges environ sont présentées au tableau 2. En outre, basés sur les résultats des développements en polynômes de *Zernike*, le facteur d'asphéricité *k* et le nombre de *Strehl* sont également déterminés à l'aide d'un petit programme écrit sur le logiciel Mathcad.

Par ailleurs, deux logiciels offrant un traitement automatique des images, OpenFringe et DFTFringe, sont testés. Ceux-ci ne procèdent cependant pas à la reconnaissance des positions des franges, mais effectuent un traitement global de l'image via une transformation de *Fourier*. Pour assurer un bon fonctionnement, il convient que l'interférogramme montre un nombre un peu plus élevé de franges. Il semble que les résultats les meilleurs sont obtenus avec 10 à 25 franges. On note cependant une plus grande variabilité des résultats, sans doute dû au «bruit» optique de l'image; quelques mesures donnant des valeurs d'asphéricité *k* farfelues (supérieures à -0.6 ou inférieures à -1.2 !) ont été supprimées. Une cinquantaine de mesures avec chacun des logiciels a été effectuée. Les résultats sont portés également au tableau 2.

La méthode interférométrique donne des résultats relativement homogènes. On note que la précision de la surface du miroir est globalement moins bonne que celle déterminée par la méthode de *Foucault*. On peut comprendre ces résultats car les aberrations sans symétrie axiale (coma, astigmatisme) sont ici prises en compte, contrai-

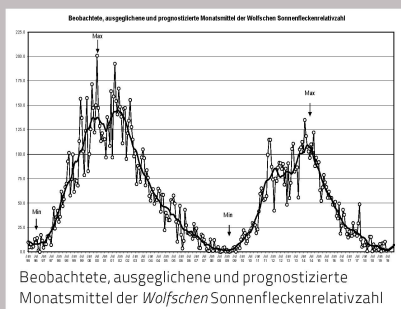
Logiciel	Méthode	k effectif	Erreur rms sur l'onde pour k = 1	Strehl
OpenFringe	Détection franges manuel	-0.885	$\lambda/14.6$	0.832
FringeXP	Détection franges manuel	-0.900	$\lambda/15.5$	0.849
Mathcad	Avec Zernike tiré de OpenFringe	-0.908	$\lambda/12.6$	0.781
Mathcad	Avec Zernike tiré de FringeXP	-0.911	$\lambda/13.2$	0.797
OpenFringe	Automatique par FFT	-0.929	$\lambda/18.8$	0.885
DFTFringe	Automatique par FFT	-0.909	$\lambda/16.6$	0.867
Moyenne		-0.907	$\lambda/15$	0.855

Tableau 2 : Résultats des mesures du miroir par interférométrie.

Quelle: Lucien Falco

## Swiss Wolf Numbers 2019

Marcel Bissegger, Gasse 52, CH-2553 Safnern



### Juli 2019 Mittel: 0.6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
2	0	0	0	0	0	7	2	0	0	
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
5	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0

### August 2019 Mittel: 0.7

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
0	0	0	0	10	2	3	4	0	0	
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

### 07/2019

Name	Instrument	Beob.
Barnes H.	Refr 76	16
Bissegger M.	Refr 100	5
Ekatodramis S.	Refr 120	1
Enderli P.	Refr 102	6
Erzinger T.	Refr 90	22
Friedli T.	Refr 40	2
Friedli T.	Refr 80	2
Früh M.	Refl 300	25
Käser J.	Refr 100	28
Meister S.	Refr 125	18
Menet M.	Refr 102	2
Mutti M.	Refr 80	2
Niklaus K.	Refr 126	3
Schenker J.	Refr 120	10
SIDC S.	SIDC 1	1
Tarnutzer A.	Refr 203	10
Weiss P.	Refr 82	19
Zutter U.	Refr 90	24

### 08/2019

Name	Instrument	Beob.
Barnes H.	Refr 76	10
Bissegger M.	Refr 100	4
Ekatodramis S.	Refr 120	6
Enderli P.	Refr 102	5
Erzinger T.	Refr 90	23
Friedli T.	Refr 40	6
Friedli T.	Refr 80	6
Früh M.	Refl 300	23
Käser J.	Refr 100	24
Meister S.	Refr 125	16
Menet M.	Refr 102	4
Niklaus K.	Refr 126	2
Schenker J.	Refr 120	9
Tarnutzer A.	Refl 203	6
Trefzger C.	Refl 125	9
Weiss P.	Refr 82	21
Zutter U.	Refr 90	23

## Swiss Occultation Numbers 2019

Fachgruppe Sternbedeckungen SOTAS (www.occultations.ch)

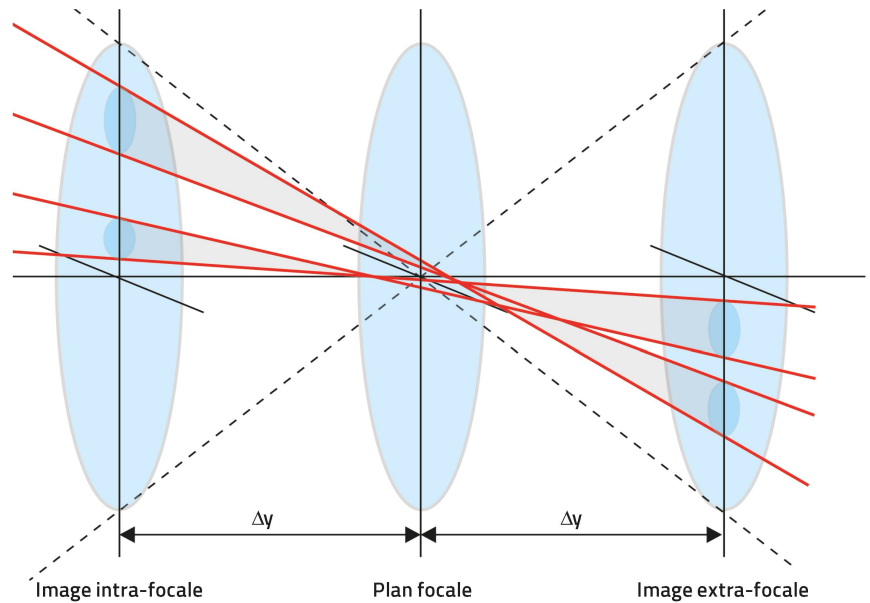
Mai & Juni 2019		05/19		06/19		Positive Ereignisse				
Beobachter	Lage	ID	+	-	+	-	Asteroiden	Datum	Bed. Stern	Obs.
Sposetti St.	Aquarossa	AQU	0	0	0	0				
Meister / Schweizer	Bülach	BUE	0	2	0	12				
Manna A.	Cugnasco	CUG	0	0	0	0				
Hehli Chr.	Degersheim	DEG	0	0	0	0				
Kohl M.	Dürnten	DUE	0	1	0	0				
Sposetti St.	Gnosca	GNO	0	0	0	1				
Sposetti St.	Locarno	LOC	0	0	0	0				
Ossola A.	Muzzano	MUZ	0	1	0	0				
Schenker / Käser	Schafmatt	SCH	0	0	0	0				
Schweizer A.	Wettswil	WET	0	1	0	0				

rement à la méthode de *Foucault*. Mais surtout, la définition spatiale de la surface est beaucoup plus fine, donc des détails plus petits sont ici aussi accessibles.

### MÉTHODE DE TEST PAR IMAGERIE STELLAIRE

Cette méthode a été imaginée notamment par *B. Kestner* et *J. Dobson*: en pointant le télescope sur une étoile, l'observation de l'image défocalisée en positions intra- et extra-focale renseigne sur la qualité du télescope. Le logiciel WinRoddier effectuant ce traitement a été développé par *F. Roddier* [10].

Son principe de fonctionnement est illustré à la fig. 10: si le pinceau lumineux issu d'une certaine zone du miroir converge par exemple plus près du plan médian, sa taille mesurée sur un plan intra-focal est plus petite que sa taille mesurée sur un plan extra-focal équidistant par rapport à ce plan médian. La mesure de la répartition d'éclairement entre ces deux plans permet donc, en principe, de déduire la forme du faisceau. Il est mentionné qu'un fonctionnement correct du programme nécessite une défocalisation engendrant une tache d'environ 80 à 120 pixels de diamètre sur la caméra, et doit être sensiblement identique pour les deux positions, intra- et extra-focale.

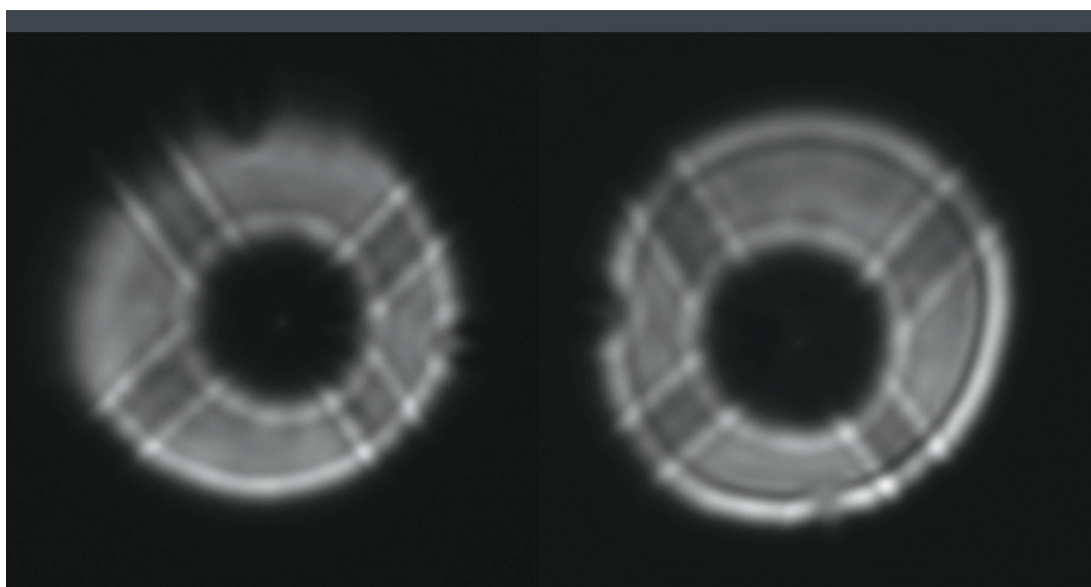


**Figure 10:** Principe de la méthode de défocalisation (*Roddier*): images en positions intra- et extra-focale.

Image: Lucien Falco

A noter que cette méthode ne renseigne pas sur la qualité du miroir seul, mais sur tout le télescope, incluant donc le miroir secondaire ainsi que la précision de l'alignement. De plus, elle est également sensible aux aberrations de l'onde incidente, donc à l'agitation de l'air. Il est assez facile de réduire ce dernier effet en choi-

sisant comme source une étoile brillante située près du zénith et en effectuant les mesures durant une nuit où l'atmosphère n'est pas trop agitée. Pour minimiser encore ce problème, on effectue l'acquisition d'un grand nombre d'images qu'on additionne comme on le ferait avec des images planétaires au moyen d'un logiciel



**Figure 11:** Images intra- et extra-focales de Capella – diamètre des disques env. 240 pixels.

Image: Lucien Falco



adapté (Registax, Autostakkert!, par exemple).

Pour tester le système, des mesures sont effectuées sur deux plans de défocalisation différents générant des diamètres de taches de 120 et 240 pixels environ; chacune des configurations est enregistrée 5 fois en faisant l'acquisition d'environ 1000 images à chaque fois. L'étoile Capella est pointée lors de son passage près du méridien. Une caméra The Imaging Source DMK72, possédant des pixels carrés de 2.2  $\mu\text{m}$ , est employée pour la prise de vue; le logiciel Autostakkert! a ensuite été utilisé pour additionner la série d'images prise lors de chaque enregistrement. Les images intra- et extra-focales moyennées sont représentées fig. 11. On note immédiatement que l'alignement du télescope n'est parfait!

Cette méthode apporte cependant un résultat surprenant: alors qu'on pouvait s'attendre à une dégradation des performances, suite par exemple aux erreurs d'alignement du télescope, il s'avère que la qualité mesurée est la meilleure de celle des trois méthodes. Ce résultat est difficilement explicable.

### COMPARAISON DES RÉSULTATS

Le tableau 4 résume les résultats moyens obtenus avec les trois méthodes testées. Le nombre de *Strehl* mesuré varie de 0.889 à 0.949 avec la méthode de *Foucault*, de 0.781 à 0.885 avec la mesure interférométrique. Cette dernière montre donc une plus grande variabilité des résultats selon le traitement des franges adopté. Elle permet cependant de caractériser plus finement la surface du miroir grâce à une

plus grande résolution spatiale ainsi qu'une prise en compte des défauts sans symétrie de révolution. Sa mise en œuvre s'avère par contre un peu plus complexe que la méthode de *Foucault*.

On peut donc conseiller d'adopter la méthode de *Foucault* pour les travaux de suivi lors du polissage du miroir, mais de finaliser la caractérisation par interférométrie. La méthode de *Roddier* est surtout intéressante pour caractériser un télescope complet, sans avoir à démonter le tube optique afin d'accéder au miroir principal. Cependant, les résultats reçus paraissent plus discutables par rapport à ceux des autres méthodes.

### CONCLUSION

La méthode de *Foucault* constitue un moyen simple et efficace pour contrôler la surface d'un miroir asphérique. Par opposition à la méthode traditionnelle utilisant un masque, celle effectuée sans ce masque, où une caméra numérique remplace l'œil, est à

conseiller car elle fournit une meilleure résolution spatiale de la surface réfléchissante et est certainement plus précise. Cependant, seuls les défauts de révolution sont mesurés par ce procédé.

L'interférométrie, basée sur l'interféromètre de *Bath*, n'est pas beaucoup plus compliquée à mettre en œuvre que la méthode de *Foucault* et fournit une connaissance plus détaillée de la surface, incluant les défauts sans symétrie de révolution. Son traitement numérique est cependant un peu plus long; on pourrait donc la conseiller pour effectuer le contrôle final du miroir.

La méthode utilisant l'imagerie stellaire défocalisée semble un peu plus délicate à valider, mais son immense avantage est qu'elle s'effectue sur le télescope complet. Elle peut donc s'appliquer à des télescopes du commerce, comme par exemple des *Schmidt-Cassegrain*, des *Richtey-Chrétien* ou des lunettes, que l'amateur ne souhaite pas devoir démonter pour obtenir une information sur la qualité optique. ◀

Méthode	k effectif	Erreur rms sur l'onde	Strehl
Imagerie stellaire - Roddier	-	$\lambda/23.5$	0.931

Tableau 3 : Résultat de la mesure selon *Roddier*.

Quelle: Lucien Falco

Méthode	k effectif	Erreur rms pour k=1	Strehl
Foucault	- 0.943	$\lambda/20$	0.931
Interférométrie	- 0.907	$\lambda/15$	0.855
Imagerie stellaire - Roddier	-	$\lambda/23.5$	0.931

Tableau 4 : Comparaison des résultats obtenus avec les trois méthodes de mesure.

Quelle: Lucien Falco

### LOGICIELS

Mathcad: [www.ptc.com/en/products/mathcad](http://www.ptc.com/en/products/mathcad)  
 OpenFringe: <https://sourceforge.net/projects/openfringe>  
 FringeXP: [www.ceravolo.com/fringeXP.html](http://www.ceravolo.com/fringeXP.html)  
 DFTFringe: <https://github.com/githubdoe/DFTFringe/release/tag/v2.1>  
 WinRoddier: [www.astrosurf.com/tests/roddier/projet.html](http://www.astrosurf.com/tests/roddier/projet.html)  
 Autostakkert!: [www.autostakkert.com](http://www.autostakkert.com)

### BIBLIOGRAPHIE

- [5] *Malacara, D.*, «Twyman-Green Interferometer», *Optical Shop Testing*, Wiley (2007).  
 [6] *Bath, K.*, «Ein einfaches common path interferometer», *Optik* 36 (1972).  
 [7] *Bath, K.*, «Advanced Telescope Making Techniques», Vol. 1, pp. 297-306, *Willmann-Bell* (1986).  
 [8] *Zernike, F.*, «Beugungstheorie des Schneidenverfahrens und seiner verbesserten Form, der Phasenkonstrastmethode» *Physica* 1 (8) (1934).  
 [9] *Wyant, J. C., Creath, K.* «Basic Wavefront Aberration Theory for Optical Metrology» *Applied Optics and Optical Engineering*, Vol. XI (1992).  
 [10] *Roddier, C. et al.*, «Testing optical telescopes from defocused stellar images», *SPIE* June (1994).