

# Automatisation du test de Foucault

Alexandre Becoulet  
alexandre.becoulet@free.fr

13 juin 2011

Tous les astronomes amateurs ayant cherché à évaluer la qualité optique d'un miroir de télescope ont entendu parler du test de Foucault, la première méthode fiable qui a permis de déterminer avec précision la forme d'une surface optique.

Avant cette découverte de Léon Foucault en 1858 [1], la qualité des instruments ne pouvait être évaluée qu'empiriquement et leur élaboration n'employait aucun moyen de contrôle. Bien que l'on ait su depuis l'invention du télescope, en 1668 par Isaac Newton, que la forme idéale théorique du miroir était parabolique, la qualité de fabrication restait tout à fait aléatoire. Les miroirs de qualité de plus de 300mm restaient généralement hors de portée à cette époque.

Aujourd'hui, le test de Foucault reste la méthode de choix pour les amateurs qui désirent évaluer la qualité de leurs optiques ou qui souhaitent se lancer dans la réalisation d'un miroir. Dans sa forme la plus simple, ce test ne nécessite aucun matériel complexe ou coûteux et sa mise en oeuvre est à la portée de tous. Pour les plus audacieux, nous verrons que les technologies modernes permettent d'aller plus loin en automatisant partiellement ou totalement le test de Foucault [7], pour en augmenter encore la précision. Rappelons que ce test permet d'apprécier des détails de surface d'ordre nanométrique, précision requise pour évaluer une optique en décelant des défauts plus petits qu'une fraction de la longueur d'onde de la lumière.

Avant de se lancer dans la pratique, il est important de bien comprendre le fonctionnement de base et d'avoir un aperçu de la théorie plus complexe qui se cache derrière cette invention. Le test de Foucault revêt un caractère expérimental, pour lequel le savoir faire et l'expérience contribuent indéniablement à la réussite et à la précision des résultats. Cependant c'est

le traitement des données expérimentales qui permet de comparer la forme du miroir à la courbe théorique recherchée. Même pour les plus aguerris quant au procédé, mais qui ont l'habitude de laisser la tâche calculatoire à l'ordinateur, il peut être intéressant de s'attarder quelques peu sur la théorie. Il est important de comprendre ce que le test de Foucault apporte mais aussi ce qu'il ne permet pas de mesurer. Cette connaissance permettra également d'apprécier les réels atouts d'un test automatisé.

## 1 Principe de base

Le test de Foucault ne mesure pas directement la courbe du miroir, mais plutôt sa dérivée. Autrement dit, ce que l'on peut observer au travers de l'appareil de Foucault indique la pente de la surface. Plus précisément, **le test de Foucault compare la pente de la surface mesurée à celle d'une sphère parfaite** (fig. 1). On observe des différences de luminosité, sur toute la largeur du miroir, qui renseignent sur la variation de la pente par rapport à cette sphère. Un miroir parfaitement sphérique donne donc une teinte plate uniforme.

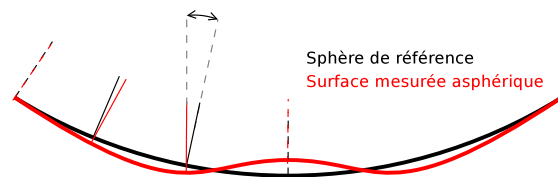


FIGURE 1 – Le test de foucault met en évidence les différences de pente par rapport à une sphère de référence.

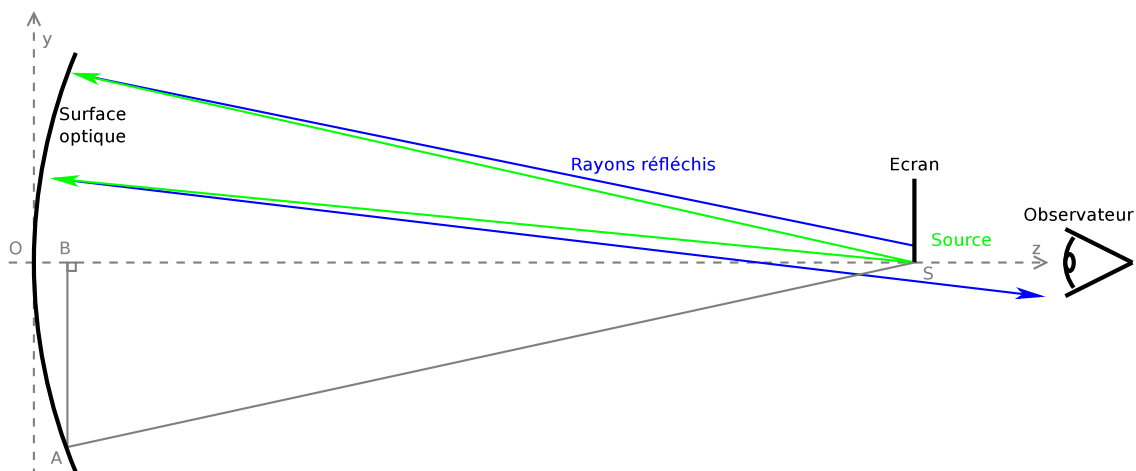


FIGURE 2 – Configuration optique et géométrique du test

Pour effectuer cette mesure, on place une source lumineuse ponctuelle à une distance du miroir égale au rayon de la sphère de référence et on masque grâce à une lame écran une partie seulement des rayons lumineux réfléchis. Rappelons que cette distance est le rayon de courbure et qu'elle est le double de la distance focale. On considère que la source lumineuse et la lame sont confondues (fig. 2).

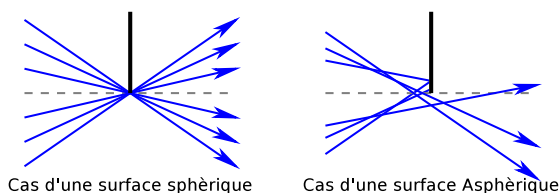


FIGURE 3 – Masquages des rayons réfléchis selon la courbe de la surface optique

Lorsque l'on mesure une surface sphérique, tous les rayons réfléchis passent par un même point sur le bord de la lame et l'observateur distingue la surface avec une luminosité uniforme. Lorsque, au contraire, la pente diffère de la sphère de référence en un point du miroir, le rayon réfléchi est dévié. Il est alors bloqué par la lame écran, ou s'en éloigne, selon le sens de la différence (fig. 3). De cette manière une différence de pente négative se traduit par un assombrissement de la zone du miroir pour l'observateur, tandis qu'une différence de pente positive produit l'illumination complète de la zone. La figure 4 montre l'image d'un miroir parabolique au travers de l'appareil de Foucault.

**Le test de Foucault ne considère qu'une**

**bande de la surface optique**, celle qui est perpendiculaire au bord de l'écran, c'est à dire le long d'une ligne horizontale passant par le centre du miroir (fig. 4). On fait l'hypothèse que la surface mesurée est une symétrie de révolution. Cette limitation n'est généralement pas un problème pour les miroirs réalisés par l'amateur, une technique de polissage soignée garantissant ce résultat. Il reste possible de contrôler facilement l'hypothèse de symétrie de révolution en observant une étoile à fort grossissement. Notons que les miroirs du commerce, polis plus rapidement, sont cependant d'avantage sujet à l'astigmatisme.

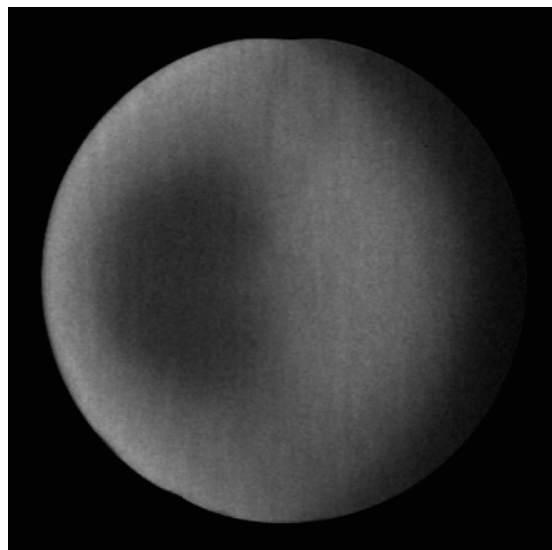


FIGURE 4 – Miroir parabolique vu au travers de l'appareil de Foucault

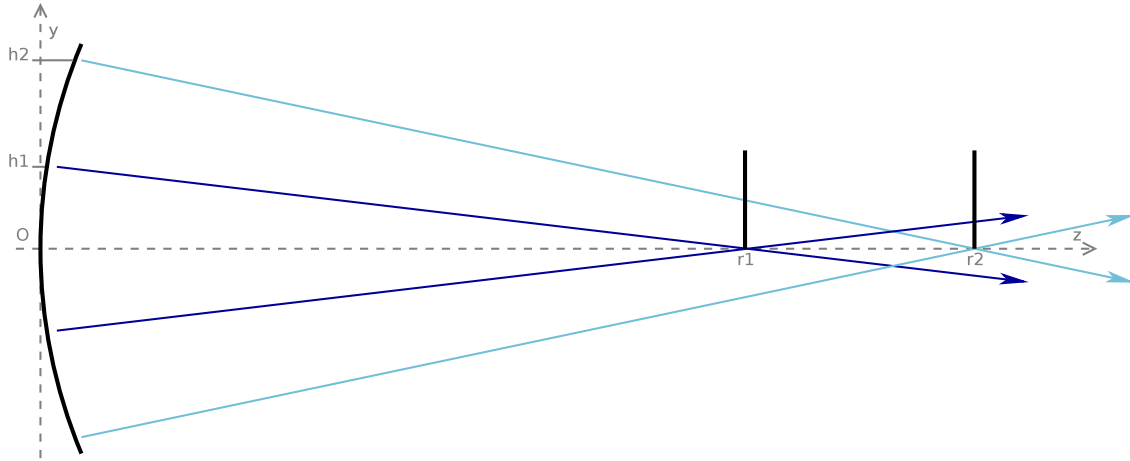


FIGURE 5 – Mesure de différentes zones d’une surface asphérique

## 2 Mesure de la surface

Le procédé de mesure d’une surface optique exploite le principe énoncé précédemment pour déterminer la pente de la surface en plusieurs points du miroir. En fait tout se passe comme si la surface mesurée était décomposée en zones concentriques correspondant chacune à une sphère possédant un rayon de courbure propre : les rayons réfléchis par une même zone coupent l’axe optique au centre de cette sphère (fig. 5). Il reste à localiser ces points pour chaque zone afin d’obtenir une série de mesures. **Une série de mesures est composée de couples de valeurs associant la hauteur d’une zone à son rayon de courbure**, c’est à dire les distances  $[BA]$  et  $[OS]$  (fig. 2). La pente est donnée par l’hypothénuse dans le triangle rectangle  $ABS$  qui est normale à la surface optique.

Dans le cas du test manuel classique, on délimite sur le miroir plusieurs zones concentriques, de 4 à 10 généralement, puis on apprécie la luminosité de chaque zone à l’œil nu. L’appareil de Foucault permet de déplacer la lame écran le long de l’axe optique de manière précise est quantifiée grâce à une vis micrométrique ou à un comparateur, sur une distance de 50mm environ. Il permet également de déplacer la lame perpendiculairement pour la faire pénétrer dans le faisceau et ajuster ainsi l’extinction. L’opérateur doit trouver, pour chaque zone, la position où se croisent les rayons réfléchis. Un masque de Couder, aussi appelé écran à échancrures [2] [5], est apposé contre le miroir pour matérialiser les zones (fig. 6). Il devient alors possible de rechercher le rayon de courbure pour lequel la luminosité est uniforme dans une

même zone, de part et d’autre du centre pour établir la mesure.

Au delà de la forme, qui nous intéresse ici, l’image fournie par l’appareil de Foucault permet de tirer de nombreuses conclusions quant à l’état de surface du miroir et plusieurs méthodes d’interprétation des images sont décrites dans la littérature [3] [4].

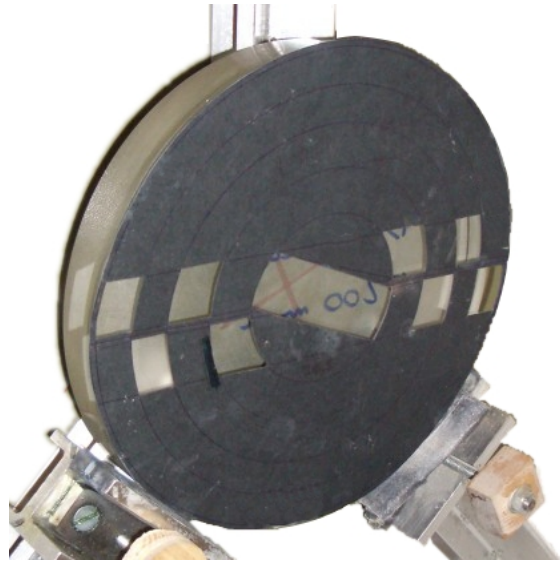


FIGURE 6 – Masque de couder matérialisant 5 zones apposé sur un miroir en cours de test

### 3 Calcul de la forme

Une fois la liste de mesures expérimentales acquise, il reste à l'exploiter pour comparer la courbe du miroir à la courbe théorique attendue (courbe de référence). Plusieurs approches existent. Les plus simples cherchent à déterminer les mesures de pente que donnerait la courbe de référence et opèrent une comparaison directe sur ces dernières, sans déterminer la forme de l'optique.

Aujourd'hui l'approche la plus directe peut être mise en oeuvre grâce à l'outil informatique : reconstituer la forme de la surface à partir de la pente mesurée. En d'autres termes, il est possible de calculer la courbe en connaissant sa dérivée en plusieurs points. Sans entrer plus en avant dans les détails mathématiques il s'agit d'intégrer numériquement une équation différentielle avec un algorithme informatique [6], après avoir interpolé nos valeurs expérimentales pour faire comme si la pente était connue pour chaque millimètre du miroir. L'ordinateur détermine alors la forme du miroir le long de la ligne de mesure.

Une fois la courbe reconstituée il reste une dernière étape avant de pouvoir comparer l'optique à la courbe de référence, généralement une parabole ou autre conique. Dans cette dernière étape il s'agit de déterminer les paramètres de la courbe de référence la plus proche du miroir. En effet, lorsque l'on cherche à évaluer la qualité optique d'un télescope de Newton, par exemple, il importe peu de vérifier sa longueur focale au dixième de millimètre près, l'important étant de s'assurer que l'on approche au maximum une des paraboles possibles. Pourtant un écart minime sur la focale modifie considérablement la forme de la courbe de référence. Le logiciel recherche donc la focale de la parabole correspondant le mieux au miroir, en utilisant une méthode de réduction mathématique. Après quoi il peut afficher graphiquement **les défauts de la surface par rapport à la courbe idéale la plus proche** en tout point de la ligne de mesure (fig. 18).

Cette dernière étape est à méditer pour éviter certains raisonnements hasardeux. Par exemple, il est incorrect de croire que l'on peut mesurer toute la surface d'un miroir, et donc vérifier sa symétrie de révolution, en appliquant le test de Foucault selon plusieurs directions (en faisant tourner le miroir sur son support entre deux applications du test). En effet, on peut ainsi garantir que l'on a plusieurs paraboles valables sur différents axes de mesure, mais rien ne prouve qu'elles ont la même distance focale. De la même manière, lors du polissage d'un miroir, la comparaison de deux résultats ne permet pas d'apprécier très précisément la quantité de verre qui a été déplacé par une retouche, puisque la focale et les conditions

du test ont changé, on ne se compare plus à la même courbe de référence choisie par le logiciel.

Pour garantir ces hypothèses et pouvoir ignorer cette dernière étape, il faudrait réunir plusieurs conditions expérimentales : être capable de mesurer très précisément la distance entre la lame de l'appareil de Foucault et le miroir avant chaque mesure (l'appareil de Foucault ne quantifiant précisément que les déplacements relatifs de la lame), posséder un miroir dont le dos et la tranche sont parfaitement alignés par rapport à l'axe optique pour pouvoir le tourner sur son support sans changer l'alignement et la distance de la surface, et enfin, être capable de le replacer sur son support à chaque fois avec la même précision.

Plusieurs contrôles valent mieux qu'un et le test de Foucault peut être recoupé avec d'autres techniques d'évaluation telle que l'interférométrie, qui permet de mesurer l'ensemble de la surface et de quantifier l'astigmatisme.

### 4 Les limites de l'oeil

Outre les limites inhérentes au test de Foucault, l'application manuelle du procédé introduit quelques inconvénients et imprécisions que l'automatisation permet de contourner.

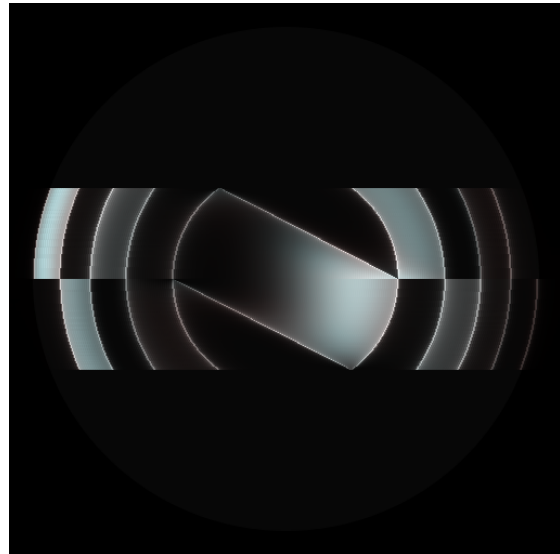


FIGURE 7 – Simulation informatique du phénomène de diffraction du au masque de Couder, mesure de la zone 3

La première critique que l'on peut faire à l'égard de ce test est la subjectivité due à la mesure à l'oeil. Il n'est pas rare que plusieurs opérateurs expérimentés ne s'accordent pas sur la mesure d'un miroir, ou

que plusieurs mesures successives donnent des résultats variant quelques peu. La difficulté de la mesure n'est pas toujours égale et une variation importante de la pente à l'intérieur même d'une zone perturbe généralement les observations. La solution est assez simple, **il suffit de remplacer l'observateur par un capteur électronique**, c'est à dire une caméra CCD ou un appareil photo numérique, qui va permettre de faire des mesures photométriques.

Le masque de Couder pose également quelques problèmes : lorsque les zones deviennent nombreuses, pour les miroirs très déformés ou très ouverts, la largeur des zones diminue et la difficulté d'appréciation augmente. Des phénomènes de diffraction se produisent également (fig. 7), modifiant la luminosité à l'intérieur des zones [3] [5]. Cependant, une fois la caméra installée, **le masque de Couder peut être supprimé** car le logiciel qui traite les images n'en a pas besoin pour se repérer précisément le long de la ligne de mesure.

Comme nous l'avons vu, le nombre de points de mesure sur le miroir reste faible, et l'interpolation que l'on doit réaliser pour connaître la pente entre deux zones fait l'hypothèse qu'il n'y a pas de variations rapides. De plus l'observation au bord du miroir est souvent difficile, la mesure et l'extrapolation pour cette zone critique est souvent incertaine. Dans le pire cas, la différence entre les défauts déduits du test et les défauts réels peut être importante (fig. 8). La numérisation de image et **le traitement par logiciel permettent d'augmenter très considérablement le nombre de mesures** : théoriquement une zone par pixel sur la ligne de mesure.

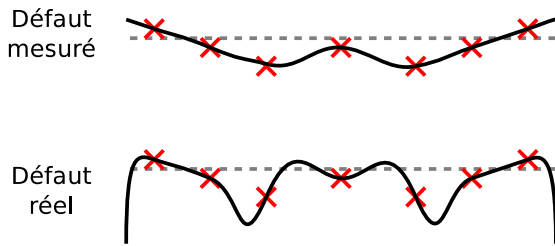


FIGURE 8 – Imprécision du test du à l'interpolation entre les points de mesure

Les solutions proposées ici marquent une première étape dans la modernisation du test de Foucault, les manipulations pour déplacer la lame étant toujours effectuées par un opérateur, les observations et analyses sont réalisées par une machine.

Avant d'aller plus loin, Il est important de noter que plusieurs facteurs perturbent les images que l'on observe à travers un appareil de Foucault : la turbulence atmosphérique due aux différences de températures (fig. 9), les reflets parasites (provenant du dos du miroir entre autres). Lors de l'utilisation d'une caméra on peut ajouter le bruit électronique du au capteur et le vignetage de l'objectif.

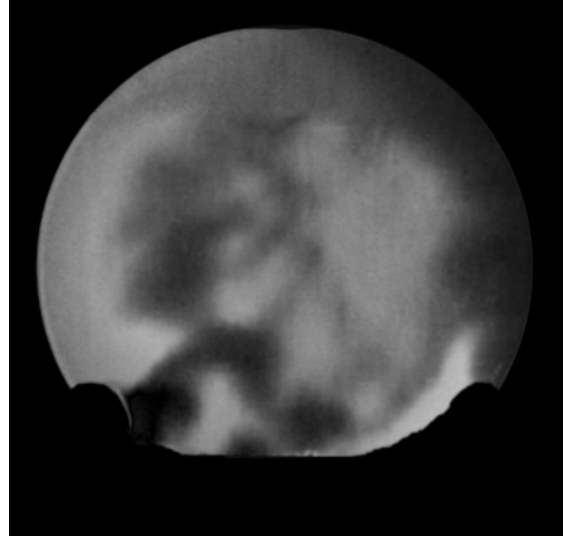


FIGURE 9 – Image d'une parabole déformée par la turbulence de l'air lorsque l'on passe la main sous le chemin optique

## 5 Automatisation

L'automatisation du test de Foucault [7] implique le contrôle par ordinateur du déplacement de la lame et de la caméra selon deux axes.

Pour obtenir une liste de mesures, **il y a deux approches possibles : à zone prédéterminée rechercher le rayon de courbure, ou a rayon de courbure prédéterminé rechercher la zone nulle** sur l'image. De la même manière, il y a plusieurs façons d'envisager l'automatisation du test de Foucault. La première solution étant d'adopter la même approche que le test de Foucault classique, c'est à dire avec des zones prédéfinies, en utilisant un masque de Couder virtuel et un logiciel qui imite le comportement de l'opérateur en cherchant les valeurs du rayon de courbure le long de l'axe optique. L'autre approche est celle que nous allons étudier.



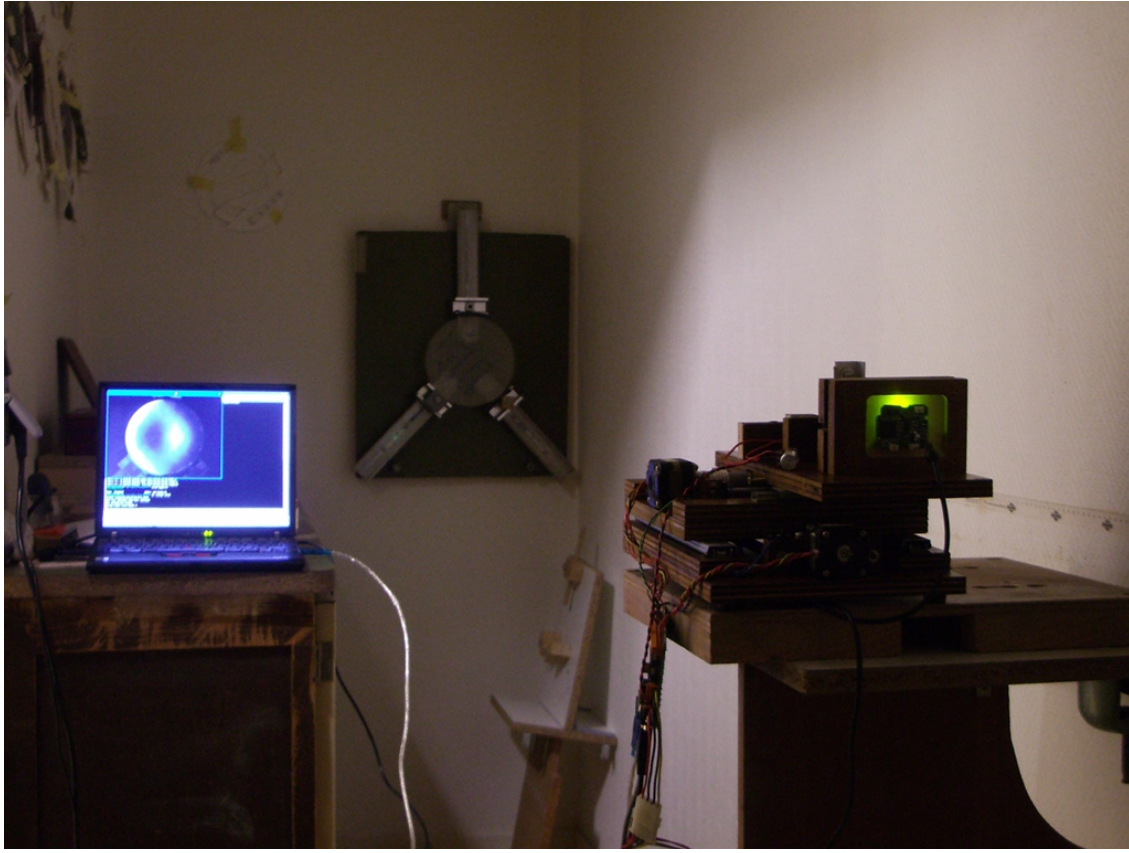


FIGURE 10 – L'appareil de Foucault automatisé analyse un miroir à l'atelier d'optique de la SAF

Le procédé classique appliqué par un opérateur humain fonctionne par approximations successives pour chaque zone, la lame est généralement déplacée plusieurs fois, en avant et en arrière, jusqu'à ce que l'image observée soit satisfaisante. L'opérateur est capable de faire abstraction des perturbations, et après quelques hésitations il valide et note la mesure. Les tests menés ont montré que cette méthode n'est pas adaptée à la machine qui n'a pas notre capacité d'abstraction et qui peut osciller longtemps avant de converger, pour obtenir une mesure précise.

**L'approche qui est retenue pour l'automatisation est d'avancer par petits pas réguliers le long de l'axe optique en capturant un grand nombre d'images** (entre 50 et 100), puis d'analyser ces images pour déterminer où se trouve la zone nulle. Contrairement au test manuel, l'extinction est réglée une fois pour toutes en position intermédiaire au début du test.

Une fois la procédure lancée, le test automatique se déroule sans intervention, il est possible de temporiser le démarrage et de sortir de la salle pour limiter

la turbulence et les vibrations (fig. 10).

## 6 Réduction des données

Lorsque la prise de mesures automatique est terminée, on obtient une série d'images du miroir pour lesquelles le rayon de courbure le long de l'axe optique est connu. Il reste deux grandes étapes avant de pouvoir apprécier la qualité de la courbe du miroir : **extraire les mesures** des images (les couples de valeurs associant un rayon de courbure à une position de zone nulle sur l'image) et finalement **procéder à la réduction de ces données** à l'aide d'une méthode classique évoquée précédemment. C'est l'étape d'extraction qui nous intéresse particulièrement ici puisque c'est elle qui est propre au test automatisé.

Il s'agit donc de trouver la position de la zone nulle sur chaque image ; les étapes suivantes sont nécessaires :

- Localiser la position et la taille en pixels du miroir sur l'image.

- Extraire un profil photométrique passant par le centre du miroir.
- Déterminer la position de la zone nulle sur ce profil, c'est à dire la position où la luminosité est équivalente de part et d'autre du centre du miroir.

## 6.1 Localisation du miroir

Pour déterminer la position et le diamètre du miroir sur l'image, on utilise une image du miroir totalement illuminé (fig 11).

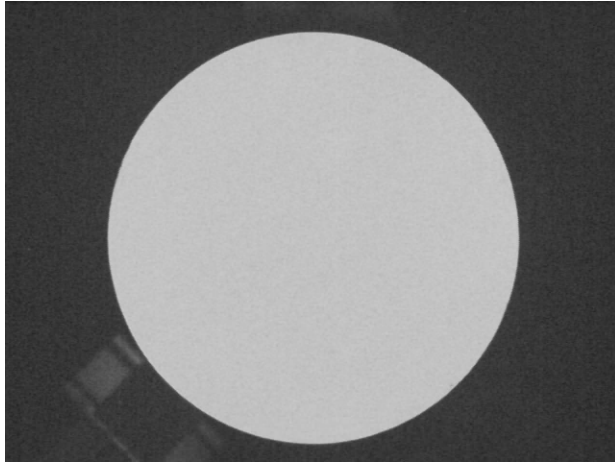


FIGURE 11 – Image du miroir avec lame totalement ouverte, utilisée pour la localisation.

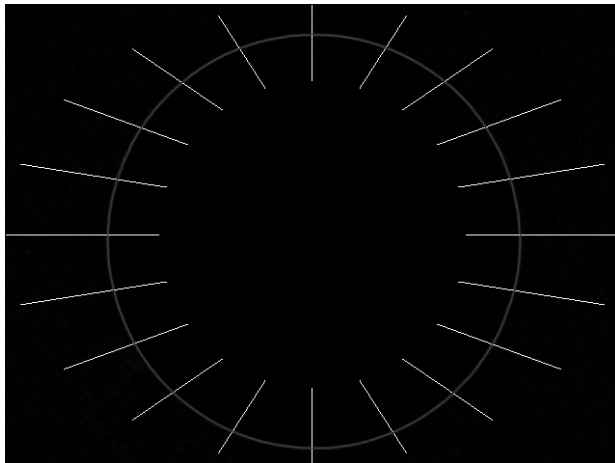


FIGURE 12 – Tracé de droites sur l'image du miroir après détection de contours, permettant la localisation du cercle

Dans la méthode proposée, on trace virtuellement

plusieurs droites susceptibles de couper le bord d'un miroir correctement cadré, après avoir appliqué un filtre convolutif de détection de contour à l'image. Le filtre permet de détecter un pic correspondant au bord du miroir, le long de chaque droite, là où le contraste est maximal entre le miroir illuminé et le fond plus sombre. La figure 12 montre le tracé des droites sur l'image filtrée. Après avoir obtenue autant de points situés sur le bord du miroir que de droites tracées, les coordonnées de ces points sont injectés dans l'équation du cercle pour déterminer la position du centre et le rayon.

Trois points sont suffisants pour déterminer les paramètres du cercle. Toutefois, pour garantir une certaine robustesse, l'opération est répétée pour plusieurs triplets de points éloignés et les résultats obtenus sont triés pour retenir la valeur médiane. Ceci permet de faire abstraction d'un éventuel artefact sur l'image qui peut être dû à un chanfrein irrégulier ou au support du miroir.

La détection peut parfois être effectuée sur une image de mesure, c'est à dire avec la lame partiellement fermée, lorsqu'aucune autre image n'est disponible. Cette méthode est moins fiable car la détection de contraste s'effectue tantôt sur le chanfrein du miroir tantôt sur le bord de la surface, ce qui donne des résultats dépendants des conditions d'éclairages et variants d'un côté à l'autre du miroir.

On considère que le miroir reste à la même position sur toutes les images et qu'aucun phénomène parasite ne vient modifier le cadrage, même légèrement, entre l'image utilisée pour la localisation et les images de mesures.

## 6.2 Extraction du profil

Une fois la position du centre et le diamètre du miroir déterminés, il devient possible d'extraire un profil photométrique, c'est à dire une courbe de luminosité le long de l'axe de mesure passant par le centre du miroir et perpendiculaire au bord de la lame. On considère ici que la lame de l'appareil de Foucault est verticale et donc que le profil à extraire se situe le long de la ligne horizontale de pixels passant par les coordonnées du centre.

Idéalement, seul une ligne de pixel doit être extraite. Toujours dans un souci de robustesse vis à vis des éventuels artefacts présents sur l'image en raison du bruit, des défauts du capteur ou de la surface du miroir, une bande haute de quelques pixels est prise en compte. La moyenne de chaque colonne de cette bande donne une première version du profil photométrique qui pourra être encore lissé par la suite à l'aide d'une moyenne glissante, par exemple. La nécessité et

l'amplitude de ce filtrage supplémentaire dépend de la qualité des images.

Il est possible, mais pas indispensable, de normaliser les images brutes par la soustraction d'une image du miroir lame totalement fermée (miroir noir) et de diviser par une image lame totalement ouverte (miroir blanc), pour s'affranchir des reflets parasites et du vignetage de l'objectif.

Contrairement à la photométrie astronomique, **la qualité des images en terme de bruit n'est absolument pas critique** car un très grand nombre de pixels contribuent au calcul d'une seule valeur par image. Une webcam de bonne qualité fait parfaitement l'affaire. Il est tout de fois intéressant de cumuler plusieurs poses par image en les espaçant de quelques dixièmes de seconde pour annuler l'effet de la turbulence.

### 6.3 Localisation de la zone nulle

Sur chaque image, la zone nulle est située où la luminosité est égale de part et d'autre du centre du miroir. On calcule donc la différence en valeur absolue entre la partie droite et la partie gauche du profil, ce qui nous donne un profil replié. Il suffit alors de chercher un minima local pour connaître la position de la zone. Pour illustration, si on réalise cette opération de repliement sur l'image du miroir directement, on observe un anneau sombre (fig. 13) à l'emplacement de la zone recherchée.

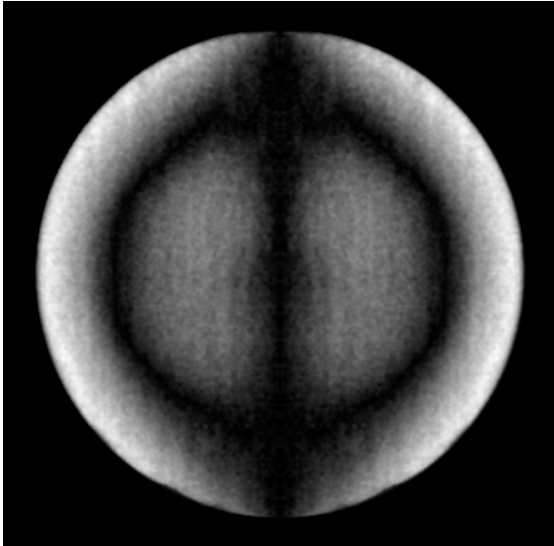


FIGURE 13 – Repliement gauche droite et différence appliqués sur l'image de la parabole (fig. 4).

La recherche du minima local n'est pas sans ambiguïté pour les images où la zone nulle se trouve proche

du bord ou proche du centre du miroir. A l'inverse, le minima peut être repéré facilement pour les zones situées à une distance intermédiaire entre le bord et le centre du miroir. Pour cette raison il est plus simple de commencer par trouver le minima local d'une zone intermédiaire puis d'utiliser cette position comme première approximation pour rechercher les minima sur les autres images (fig. 14). L'algorithme mis en place procède donc de proche en proche dans les deux directions jusqu'à atteindre le centre d'une part et le bord d'autre part.

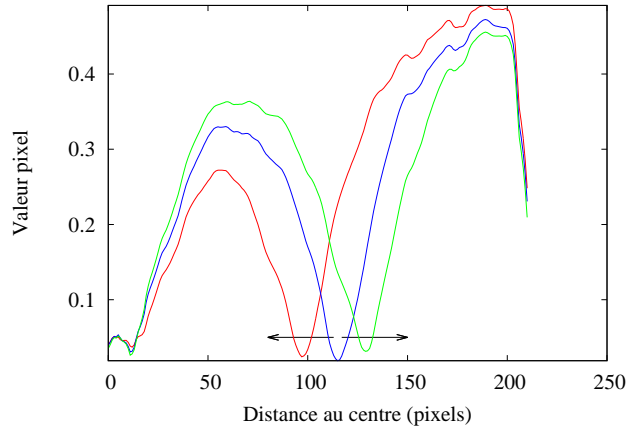


FIGURE 14 – Profils photométriques repliés pour 3 zones intermédiaires, le minima est facilement identifiable pour chaque zone.

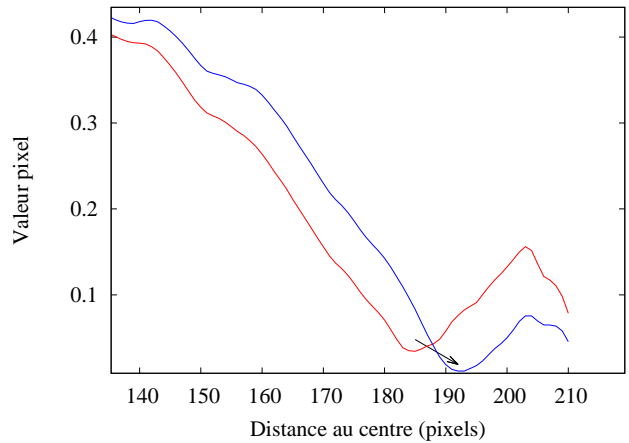


FIGURE 15 – Agrandissement de profils photométriques repliés pour deux zones proches du bord du miroir.

On remarque que le risque d'apparition d'autres minima locaux augmente lorsque l'on se rapproche du bord (fig. 15), en raison des reflets du chanfrein no-



tamment. Plus la zone considérée est proche du bord, plus la pente croissante suivant le minima est courte. Le nombre de minima parasites dans cette région varie beaucoup d'un miroir à l'autre et dépend également du filtrage utilisé. La mesure du bord doit cependant rester fiable et la méthode proposée permet de garantir que seul le minima correspondant à la zone nulle recherchée sera détecté. Le pas d'avance doit cependant rester raisonnablement petit pour pouvoir considérer l'image la plus proche comme une approximation fiable.

## 7 Considérations pratiques

La source lumineuse idéale est une LED verte haute luminosité munie d'un potentiomètre. La couleur verte permet d'exploiter le plus grand nombre de pixels sur un capteur couleur muni d'une matrice de Bayer RVB classique. Le réglage des paramètres d'exposition et de puissance de la source lumineuse est important pour éviter toute saturation qui fausserait complètement les mesures. Le logiciel vérifie cette condition. L'utilisation d'une source lumineuse sans fente (avec une lame seule ou encore *slitless*) augmente considérablement les reflets parasites.

Le choix de l'objectif est important également, un objectif zoom permettra de mesurer des miroirs d'ouvertures variées. L'ouverture de l'objectif doit être la plus grande possible. Il est très important de s'assurer que le diaphragme de l'objectif ne coupe pas le faisceau comme le fait la lame du Foucault ; d'une manière générale l'objectif doit être rapproché le plus possible de la lame, surtout pour les miroirs très ouverts. Un objectif zoom de caméra vidéo (12-75mm f/d 1.2) convient parfaitement à un capteur CCD de webcam.

L'alignement du Foucault automatique est plus délicat que celui d'un appareil de Foucault classique. En plus de placer le retour du faisceau sur le bord de la lame, il faut orienter l'appareil pour cadrer le miroir dans le champ de la caméra. D'un autre côté ceci garantit l'alignement parfait avec l'axe optique du miroir. Cet alignement n'est pas toujours soigné par les opérateurs du test manuel qui se contentent souvent de trouver le retour du faisceau sans prêter attention à l'orientation de l'appareil, ce qui introduit un biais dans la mesure. Cette procédure d'alignement plus délicate peut ralentir la mesure successive de miroirs différents par rapport au test manuel.

## 8 Réalisation

Il existe plusieurs techniques valables pour la motorisation, la solution retenue pour le prototype réalisé utilise des moteurs pas à pas actionnant des vis micrométriques. Une approche mettant en oeuvre un asservissement par encodeurs linéaires serait cependant tout aussi adéquate.

L'appareil de Foucault réalisé ici est constitué d'une platine qui peut se déplacer précisément sur deux axes. Là encore, on pourrait se contenter d'un mouvement motorisé le long de l'axe optique uniquement puisque l'extinction est ajustée une fois pour toutes avant la mesure ; ce montage permet cependant d'expérimenter les diverses approches de mesure.



FIGURE 16 – L'appareil de Foucault sans la lame

Le principe mécanique est le même pour les deux axes : Un moteur pas à pas actionne une vis micrométrique dont la partie mobile est solidaire du plateau qui se déplace. La vis micrométrique est en butée contre une équerre fixée au socle et maintenue par la tension des ressorts de rattrapage de jeu. Les deux ressorts sont enroulés sur des tiges métalliques de part et d'autre de la vis et maintiennent une légère tension contre une équerre solidaire du plateau, pour éviter tout jeu qui réduirait la précision des mesures. Le plateau inférieur met en oeuvre ce mécanisme pour un déplacement le long de l'axe optique, tandis que le plateau supérieur se charge de contrôler l'extinction. Les plateaux sont tous deux guidés par une paire de glissières à billes. Deux interrupteurs de type *microswitch* permettent de détecter la fin de la course. Les

moteurs utilisés sont de classiques 200 pas par tour, ce qui donne une résolution de 1/800 mm par demi-pas avec une vis micrométrique de 1/2 mm par tour.

Le plateau supérieur accueille un objectif zoom couplé avec un capteur CCD et son circuit, extraits d'une webcam. Divers montages optiques peuvent prendre place sur l'avant du plateau. Dans notre cas, le couteau de Foucault est constitué d'une lame de cutter positionnée au plus proche de l'objectif. La LED verte servant de source lumineuse se loge juste sous l'objectif, derrière la lame.

Outre le circuit de webcam qui est directement relié à l'ordinateur, les moteurs pas à pas sont pilotés par un circuit dédié, comme on en trouve beaucoup. Le circuit utilisé ici permet de contrôler les moteurs manuellement à l'aide d'un *pad*, en plus du pilotage par voie logicielle. Ainsi, il est possible de visualiser le miroir en direct pour effectuer les réglages de position et d'éclairage à l'aide du logiciel, avant de lancer les mesures. (fig. 10). Trois outils logiciels entrent en jeu : le premier permet de piloter l'appareil de Foucault automatisé et de réaliser l'acquisition des images, le deuxième permet d'extraire les profils photométriques des images du miroir et le dernier détermine les zones nulles et enfin réduit les données. Seul le premier logiciel interagit avec l'appareil de Foucault automatisé, les deux autres étant purement algorithmiques.

Les schéma du montage et les divers logiciels développés pour ce projet sont disponibles librement [7].

## 9 Résultats

Les expérimentation ont montré que la répétabilité du test est très bonne. Deux exécutions du test de Foucault automatisé sur un même miroir donnent sensiblement les mêmes résultats (fig. 18, 17) : moins de 2nm de différence pour l'erreur crête à crête sur la surface. La seconde mesure a été réalisée après avoir réeffectué l'alignement du dispositif.

## Références

- [1] Léon Foucault, *La construction des télescopes en verre argenté*, Annales de l'Observatoire de Paris, vol. 5, pages 197-237 (1859)  
<http://adsabs.harvard.edu/abs/1859AnPar...5..197F>
- [2] André Couder, André Danjon, *Lunettes et télescopes*, page 534
- [3] Jean Texereau, *La construction du télescope d'amateur*, chapitre 2,  
<http://www.astrosurf.com/texereau/>

```

Loading 80 folded difference data sets with 210 zones
39 zones remaining after removing duplicates
Best fit roc 3597.258159
PTV surface error: 52.738071nm , lambda/10.428899
RMS surface error: lambda/35.785907

Loading 80 folded difference data sets with 210 zones
43 zones remaining after removing duplicates
Best fit roc 3597.276734
PTV surface error: 51.085741nm , lambda/10.766214
RMS surface error: lambda/39.732252

```

FIGURE 17 – Sortie du logiciel pour deux séries de mesures d'un même miroir avec réaligement de l'optique.

La résolution de la courbe obtenue est sans comparaison avec celle du test manuel, une mesure précise du bord du miroir devient possible et le test se montre un peu plus sévère. D'une manière générale les expérimentations montrent que les miroirs mesurés à  $\lambda/12$  au test manuel sont mesurés ici à  $\lambda/8$  et satisfont au critère de Rayleigh.

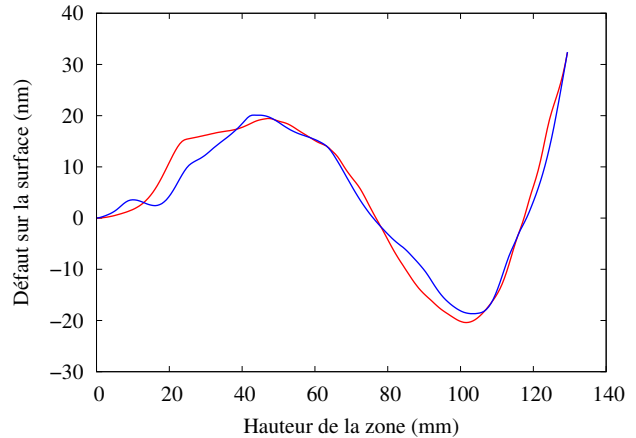


FIGURE 18 – Défauts de la surface pour deux exécutions du test sur un même miroir de 260mm de diamètre et 1800mm de focale. On note un bord relevé.

- [4] Jean-Marc Lecleire, Karine Lecleire, *Réalisez votre télescope*, 2ème édition (1998)
- [5] Nils Olof Carlin, *Designing and calculating Couder screens for Foucault testing*,  
<http://www.atmpage.org/contrib/Carlin/couder/>
- [6] Jim Burrows, *ATM Mirror Mathematics*,  
[http://home.earthlink.net/~burrjaw/atm/atm\\_math.lwp/atm\\_math.htm](http://home.earthlink.net/~burrjaw/atm/atm_math.lwp/atm_math.htm)
- [7] Alexandre Becoulet, *Réalisation d'un test de Foucault automatique*  
<http://diaxen.free.fr/wikini/wakka.php?wiki=AutoFoucault>