

Miroir, Ô mon beau miroir ...

Une aventure au cœur de la lumière à la SAP



Présentation

Il est reconnu que les miroirs du commerce accessibles au grand public sont de piètre qualité. Seul un travail manuel minutieux et long permet d'obtenir la qualité exigée par les astronomes qui veulent aller plus loin que la simple découverte. En effet la précision, c'est-à-dire les défauts de surface, requise pour obtenir une bonne image est de quelques dizaines de nanomètres, fraction de la longueur d'onde moyenne dans le visible.

L'un de nos membres avait, dans sa jeunesse, une première expérience de fabrication d'un télescope, dont l'élément critique est son miroir primaire, celui qui collecte la lumière. Il s'agissait d'un télescope de type "Newton", dont le miroir principal est parabolique.

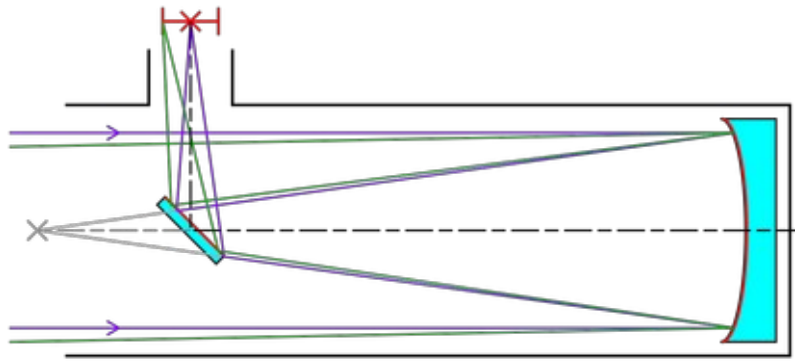


Fig 1 : schéma de principe du télescope de Newton

Devenu membre de la SAP, il a proposé à l'association la création d'un atelier de taille de miroirs. La proposition a été acceptée et le projet a démarré peu après, à commencer par l'aménagement d'une pièce dans les locaux Jolimont.

L'équipe:

- Alain Frappier
- Bruno Cabasson
- Blaise Picinbono
- Reggy Romano
- Patrick Bréda
- Anthony Pasqualini

Principe

L'objectif est d'obtenir un disque de verre ayant une surface creuse parabolique parfaitement lisse dont on maîtrise le point focal, lieu où tous les rayons lumineux arrivant dans l'axe du miroir convergent. La géométrie nous dit que dans le cas de miroirs de télescope, la surface parabolique à obtenir est très proche d'une calotte sphérique. Les tailleurs de miroirs qui nous ont précédés ont donc utilisé une technique en deux phases. La première consiste à creuser le verre pour obtenir une surface sphérique. La seconde permet de passer de la sphère à la parabole. Dans les cas de miroirs de taille habituelle, de 150 mm à 300 mm de diamètre. Le temps pour partir d'un disque de verre brut et arriver à un miroir parabolique de bonne facture est de l'ordre de 80 à 120 heures en tout pour un opérateur moyennement expérimenté.

Comment creuse-t-on un disque de verre de manière sphérique ?

Pour fixer les idées, imaginons deux disques superposés et décalons celui du dessus quelque peu.

Le poids du disque supérieur est supporté par une surface moindre du disque inférieur, avec un maximum de pression sur le milieu du bord du disque inférieur et de manière décroissante quand on s'en éloigne.

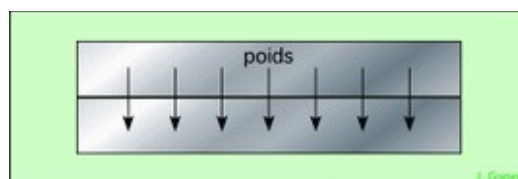


Fig 2 : disques superposés

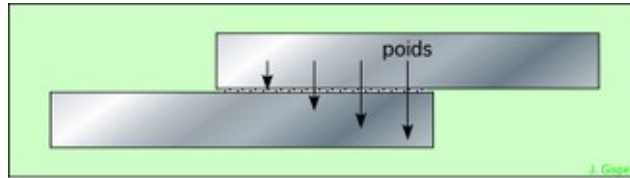


Fig 3 :disques superposés décalés

Ceci étant établi, nous intercalons des abrasifs de plus en plus fins, aspergés d'eau au moyen d'un pulvérisateur pour lubrifier et nous effectuons des courses de va-et-vient du disque supérieur décalé par rapport au disque inférieur.



Fig 4 : principe des courses

Si nous opérons un grand nombre de courses en effectuant régulièrement des rotations des disques et des déplacements de l'opérateur autour du poste, la loi des grands nombres nous dit que la surface obtenue est obligatoirement sphérique, pour des raisons de symétrie. Les éclats de verre arrachés par l'abrasif s'incorporent dans le mélange qui change de couleur. L'abrasif s'use et devient moins coupant. Il convient alors de nettoyer le poste et d'utiliser des grains neufs. On appelle cela une séchée.

Ainsi, le disque supérieur se creuse et le disque inférieur se bombe. Plus on fait de courses et plus l'abrasif est gros et agressif, plus on creuse. C'est la raison pour laquelle le futur miroir est celui du dessus. On s'arrête lorsqu'on a atteint la courbure désirée. On utilise un instrument spécifique pour mesurer le rayon de courbure, le sphéromètre. Ce dernier mesure la flèche entre le bord du disque et le centre.



Figure 5 : exemple de sphéromètre à base de comparateur (univ. du Mans)

Les gros grains creusent vite mais laissent un état de surface très rugueux. Plus on s'approche de la courbure désirée plus on utilise des grains fins. Cela ralentit le travail de creusement et rend la surface moins rugueuse.

A noter : La grosseur des grains suit une nomenclature dont le nom commence par 'C' pour carborundum ou carbure de silicium, et un chiffre qui est le même que celui des papiers de verres et émeris du commerce. Pour les grains plus fins, on utilisera des noms spécifiques, comme «cérium» et «opaline». Les abrasifs les plus fins sont constitués de grains plus petits que 1 micron.

Cette phase du travail, à grains de moins en moins gros, du C40 au C120, s'appelle **l'ébauchage**.

Maintenant il s'agit de rendre la surface de plus en plus lisse, tout en conservant le même rayon de courbure. Sachant que la pièce située sur le dessus se creuse, on mettra alternativement le miroir dessus et le miroir dessous, au moyen de courses spécifiques. Et au fur et à mesure de l'avancement, on utilisera des abrasifs de plus en plus fins, en partant du C240 jusqu'au C600 par exemple. C'est à ce stade que la surface commence à être un peu réfléchissante. Cependant, on ne peut pas encore effectuer de mesures mais un simple rayon laser en lumière rasante permet de détecter d'éventuels défauts (piqûres, rayures ...).

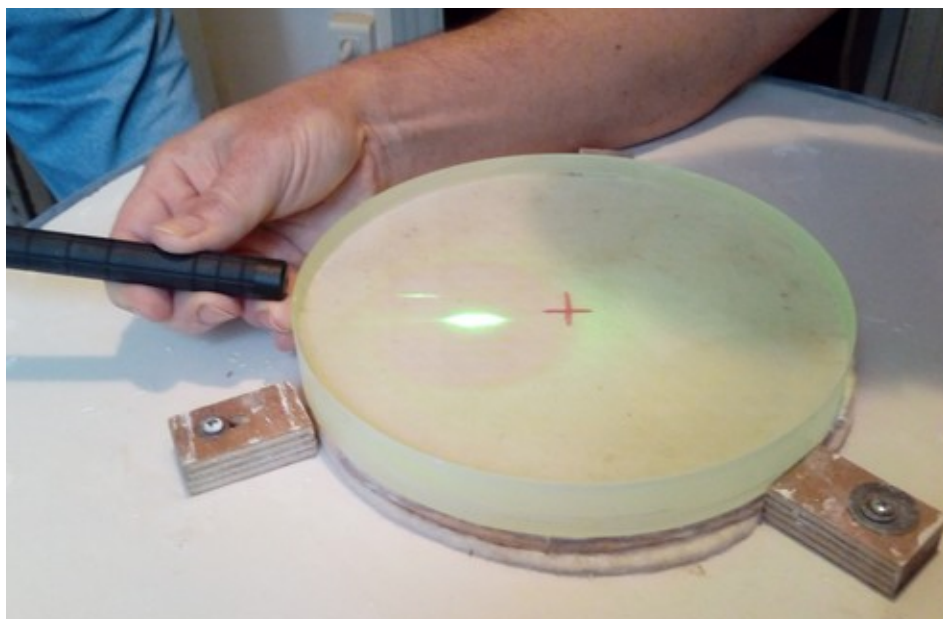


Fig 6 : contrôle au laser rasant

Cette phase du travail, à grains de plus en plus fins en alternant miroir dessus et miroir dessous, s'appelle le **doucissage**.

Désormais, nous devons rendre la surface, censément sphérique, parfaitement réfléchissante. On est amené à utiliser des produits de polissage pour lesquels un outil en verre ne convient plus car trop dur pour ce travail. On remplace le verre par de la poix, matériau qui possède une plasticité adaptée, ni trop dure ni trop rigide. On fabriquera un outil spécifique, appelé le **polissoir**, en collant des carrés de poix sur un disque support, en général du même diamètre que le miroir.



Fig 7 : notre polissoir

Il est nécessaire de faire coïncider la surface du polissoir avec la surface du miroir par un procédé appelé **pressage**. En effet, nous sommes à présent dans le domaine du micron en ce qui concerne les défauts de surface. Cette phase s'appelle le **polissage**.

A la fin de cette phase, la surface (sphérique) du miroir est parfaitement polie et réfléchissante. On peut commencer les mesures avec un appareil optique permettant de visualiser la sphéricité d'une surface réfléchissante : l'**appareil de Foucault**. Plus exactement, cet appareil mesure la différence entre une sphère parfaite et la surface du miroir en test.

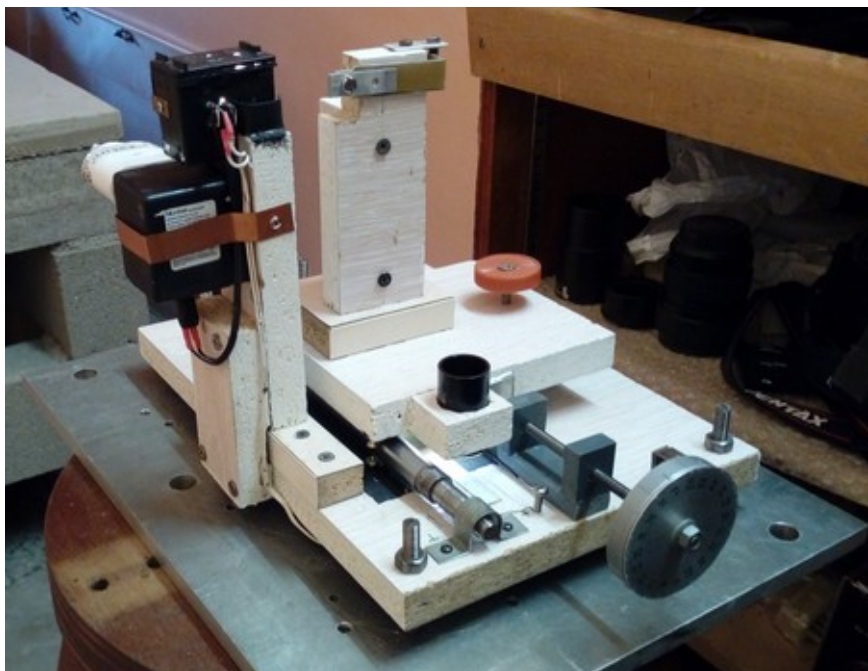


Fig 8 : premier appareil de Foucault

Comment passe-t-on de la sphère à la parabole ?

C'est le polissoir qui sera l'outil de parabolisation. Ce qui change par rapport au polissage est d'une part le type de courses utilisé et d'autre part de fréquents allers-retours entre le poste de travail et l'appareil de Foucault. En effet, on connaît, par définition, le type d'image que doit donner l'appareil quand on a affaire à une parabole.

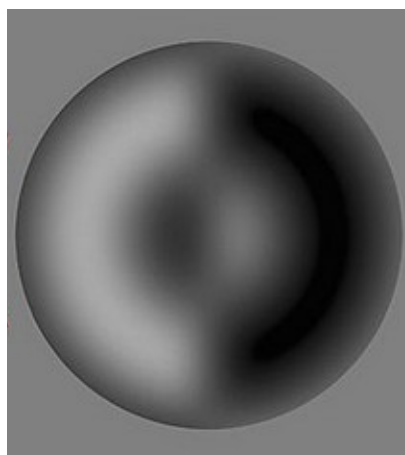


Fig 9 : Image au Foucault d'une surface parabolique

L'appareil de Foucault, au travers d'un mode opératoire spécifique, permet de qualifier et de quantifier la surface obtenue. Il s'agit de mesurer les rayons de courbures à différentes distances du centre. Les mathématiques font le reste travail. Pour cela, nous utilisons un écran que l'on place devant le miroir et qui permet de délimiter les zones correspondantes.

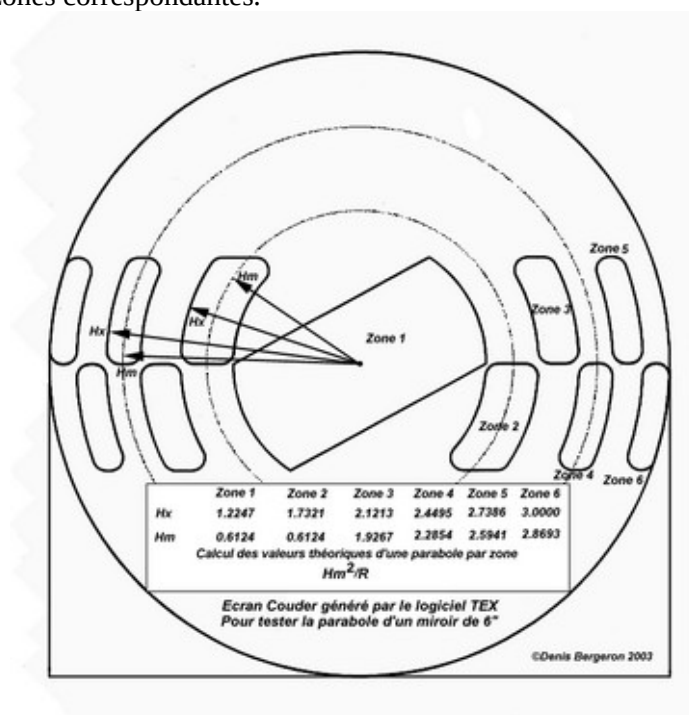


Fig 10 : principe d'écran de Couder à 6 zones

Cette phase peut durer entre 20 et 40 heures.

En résumé, le principe du travail décrit ci-dessus est illustré par l'image page suivante.


NAISSANCE D'UN MIROIR

MATIERE : le VERRE

FORME : 2 disques
1 disque miroir
1 disque outil


TAILLE : se fait par le frottement d'un disque sur l'autre, avec interposition d'abrasif et d'eau.

EBAUCHE .
Frottement miroir sur outil avec interposition de gros abrasif.



1- Au cours du travail, le miroir se creuse et l'outil devient convexe.

2- On vérifie la flèche du miroir à l'aide d'un gabarit.

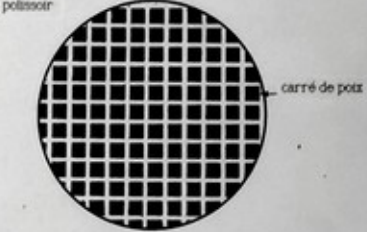


3- Quand la courbure est atteinte, on passe à la phase suivante : le DOUCI .

DOUCISSAGE .
Opération qui consiste à supprimer les grosses cassures de l'ébauchage et à affiner la forme sphérique .
Pour atteindre ce but, on diminue l'amplitude des courses outil sur miroir, en utilisant des abrasifs de plus en plus fins. (7).
Arrivé à ce stade, la surface du miroir a pris un aspect satiné et peut être polie.

POLISSAGE.

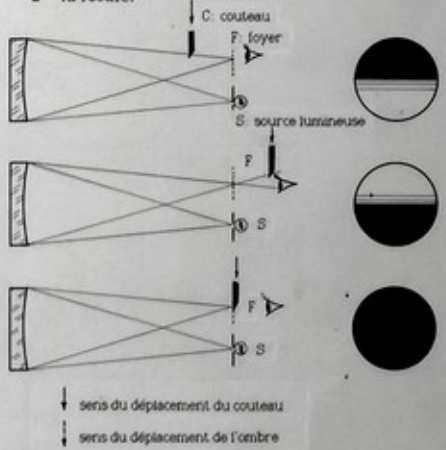
Il s'effectue à l'aide du disque outil garni de carrés de poix, disposés régulièrement.
Un abrasif extrêmement fin, mêlé d'eau, est utilisé.
Le travail est mené tantôt miroir/outil tantôt outil/miroir jusqu'à ce que toute trace de douci (gris) ait disparu.



FOUCAULTAGE ET PARABOLISATION.

Le miroir peut alors être "foucaulté".
On vérifie :

- 1 - la sphéricité.
- 2 - la focale.



Dans certains cas, le miroir sphérique est utilisé sous cette forme.
Dans la majorité des cas (Newton), il faut le paraboliser.
La parabole est obtenue par des courses particulières du polissoir.
Elle est mesurée à l'appareil de Foucault par comparaison de fenêtres diamétralement opposées, sur le même rayon (extinction).

Fig 11 : principe général

Nous arrivons presque à la fin de nos peines. Nous avons une surface parabolique satisfaisante. Mais elle reste en verre. Il nous faut terminer notre aventure en déposant une fine couche réfléchissante uniforme sur notre chef-d'œuvre. Nous avons le choix entre l'**argenture** qui consiste à déposer une couche d'argent par

un procédé chimique et l'**aluminure** qui consiste à déposer une couche d'aluminium par un procédé de diffusion d'atomes dans une enceinte sous vide.

Réalisations à la SAP

L'ouvrage de référence, mondialement reconnu et utilisé, est « La construction du télescope d'amateur, II^e édition » de Jean Texereau.

Un premier miroir de 215 mm ouvert à 6.7 a été réalisé du début à la fin dans le but de mettre en place un atelier pleinement opérationnel et de permettre à l'équipe d'avoir une première expérience. L'atelier comprend un poste de travail, un appareil de Foucault permettant d'effectuer les mesures en phase de parabolisation, installé dans le couloir de mesures (actuellement contenant les archives) du bâtiment de la SAP, ainsi qu'un endroit où on peut manipuler des produits chimiques pour l'argente finale (accueil et salle de réunion de la SAP).

Un deuxième miroir, également de 215 mm mais ouvert à 4.65, a ensuite été réalisé puis intégré dans un télescope de type Dobson construit spécialement pour l'occasion et disponible à la SAP. C'est ce dernier qui fait l'objet de la description qui suit.

Comme il est d'usage, nous avons tenu un journal pour garder la mémoire du travail effectué.

L'atelier

L'association a mis à la disposition du projet un local dans le bâtiment Carte du Ciel. Ce dernier dispose d'un point d'eau, nécessaire pour ce travail, dans l'ancien labo photo. Un bidon de 200l lesté et recouvert d'une plaque circulaire en bois mélaminé blanc a fait l'affaire. Trois cales réglables disposées à 120° bloquent la pièce du dessous (tantôt miroir, tantôt outil).



Fig 12 : poste de travail dans le local attenant à la Carte du Ciel

Outil segmenté en plâtre

Nous avons choisi une option très souvent utilisée pour constituer l'outil. Au lieu d'un disque de verre, on coule un disque en plâtre synthétique (typ. Staturoc), de même diamètre, et on y colle des carreaux verre. Certains prennent des carreaux en grès/céramique.



Fig 13 : outil segmenté en plâtre synthétique (Staturoc) avec ses carreaux de verres

Ébauchage

Nous n'avons pas rencontré de difficultés dans cette phase du travail qui s'effectue miroir dessus. Nous avons utilisé les plus gros grains : C40 au début, puis du C60 et enfin du C80. Nous noterons seulement que nous avons rajouté quelques gouttes de liquide vaisselle dans le pulvérisateur. Cela permet de se contenter d'ajouter de l'abrasif sans avoir à nettoyer le poste. De ce fait, le travail est continu et la notion de séchée ne s'applique plus réellement. Un nettoyage minutieux est impératif quand on change de grain.



Fig 14 : courses d'ébauchage miroir dessus avec des poids pour aider.

Le rayon de courbure, directement lié à la focale, a été régulièrement mesuré à l'aide d'un sphéromètre. Cet instrument mesure en réalité la flèche au centre, elle-même directement liée au rayon de courbure.



Fig 15 : notre sphéromètre à base de palmer

Lorsque le miroir atteint la courbure désirée (2 fois la focale), le travail d'ébauchage est terminé.

Doucissage

Cette phase a été assez rapide, alternant miroir dessus et miroir dessous et des contrôles réguliers au sphéromètre. Nous avons pris soin de travailler longtemps pour chaque grain afin d'assurer que le grain en cours fasse bien son travail d'érosion du grain précédent et ne laisse pas de piqûres indésirables.

Hélas, cette phase ne s'est pas déroulée sans encombres. En effet, en fin de phase, alors que nous en étions au dernier grain (cérium), outil dessus, ce dernier se bloque de manière inattendue. Après nettoyage et inspection, nous voyons de grosses rayures et de profondes piqûres ! **Catastrophe !** Un grain malencontreux s'est invité dans la bataille.

⇒ Il nous a fallu revenir 3 grains plus haut (C400, W6 et cérium), pour effacer les dégâts. Nous n'avons pas pu venir à bout des plus grosses piqûres qui sont encore visibles sur le miroir fini.



Fig 16 : rayures profondes dues à la présence d'un grain indésirable.

En fin de travail de doucissage, la surface du miroir apparaît finement dépolie, mais n'est pas encore très réfléchissante. Pour obtenir une surface réfléchissante, et donc mesurable au Foucault, une phase supplémentaire est nécessaire : le polissage.

Polissage

Nous avons utilisé un ancien hublot de bateau dont le diamètre était compatible sur lequel nous avons collé des carrés de poix d'environ 2 cm de côté et de 8 mm d'épaisseur.



Fig 17 : notre polissoir, poix sur hublot de navire.

Pressages

Avant de commencer à polir, il est absolument nécessaire de faire correspondre exactement la surface du polissoir dont les carrés sont censément plats et jamais à la même hauteur avec celle du miroir. Pour cela, nous portons le miroir à une température d'environ 35°C en le laissant entre 15 mn et 20 mn au bain marie dans de l'eau tiède dont on vérifie la température. On met ensuite le miroir sur le polissoir en interposant du papier sulfurisé (type cuisson) pour éviter les adhérences intempestives qui sont à proscrire (risque de décollage des carrés de poix). La tiédeur du miroir se transmet à la poix qui devient juste malléable comme il faut pour que la surface du polissoir s'adapte exactement à celle du miroir. On laisse la gravité agir pendant 20 mn à 30 mn puis on sépare les deux pièces en vérifiant que tous les carrés marquent le papier. On peut également vérifier en enlevant le papier et en s'assurant que le dépoli du papier a bien marqué tous les carrés. Au besoin, l'opération peut être renouvelée. Il s'agit du premier pressage dit « à chaud ».

A la fin du pressage, on vérifie que les carrés de poix ne se sont pas trop aplatis et ne se touchent surtout pas. Auquel cas, il convient, à froid, de les retailler au moyen d'un ciseau à bois large.

L'étape suivante consiste en un autre pressage, dit pressage « à blanc », en utilisant du mélange à polir à la place du papier, préparant ainsi le travail effectif de polissage qui s'ensuivra. A partir de ce point, on ne se sépare plus les deux pièces pendant toute la durée de la session. Ce qui signifie qu'il est impératif de refaire un pressage à blanc au début de chaque session de polissage et de parabolisation.

Le mélange était constitué d'opaline (grains de l'ordre du micron) et d'eau.

Polissage

Nous avons travaillé une dizaine d'heures, miroir dessus, par sessions d'au moins une heure et demie pour des raisons de stabilité thermique liée à l'échauffement des surfaces dû aux frottements.



Fig 18 : courses de polissage en 'W'

Contrôles

En cours de route, nous vérifions l'état de surface et la réflectivité visuellement au laser (incliné et rasant).

En fin de phase, la surface est suffisamment réfléchissante pour permettre un contrôle plus précis au Foucault. Dans notre cas, nous avons pu constater que le miroir était déjà un peu parabolique, qu'il serait inutile de passer par la sphère et que l'on pouvait passer à la phase de parabolisation qui consistera alors à faire les corrections nécessaires.

Parabolisation

La première chose à faire est de mesurer les écarts entre la surface de notre miroir et la parabole idéale correspondante. Nous avons fabriqué un écran de Couder à 5 zones.

Compte tenu que ce miroir a un rapport F/D inférieur à 5, quatre zones ne sont pas suffisantes.

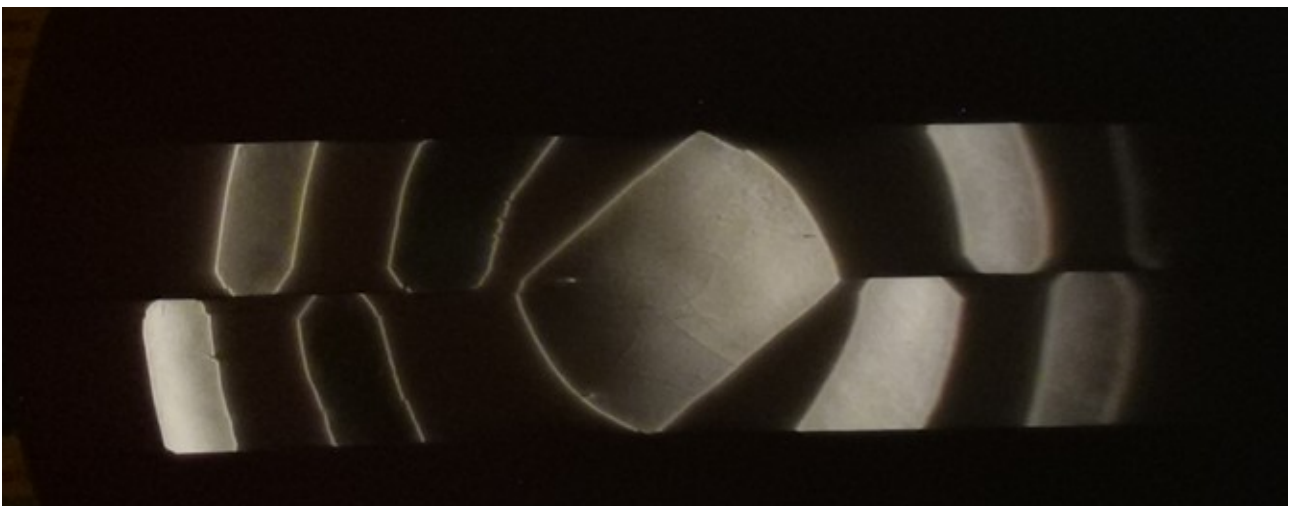


Fig 19 : image avec l'écran de Couder à 5 zones. Remarquer les nuances de gris, en particulier la 4ème en partant du centre.

NB : Une mesure au Foucault suppose que la masse du miroir soit thermiquement stable et homogène. C'est pourquoi on effectue les mesures en début de séance et non pas à la fin, laissant au moins une nuit dans l'intervalle.

En tenant compte des mesures et des indications des logiciels spécialisés, nous avons corrigé la surface en une vingtaine de séances. Nous avons rencontré des difficultés d'interprétation des résultats donnés par les logiciels et avons commencé par aller plus ou moins dans le mauvais sens. Le profil de la surface est resté médiocre et sans amélioration pendant plusieurs séances (/2.2, environ).

Au bout du compte nous avons réussi à obtenir une surface que nous avons mesurée à /17, ce qui est largement meilleur que les miroirs du commerce. En toute rigueur, il aurait fallu utiliser d'autres types de mesures et donc d'autres appareils dont nous ne disposons pas à la SAP. Par exemple, un interféromètre de Bath, en cours de fabrication, aurait été utile pour confirmer cette mesure.

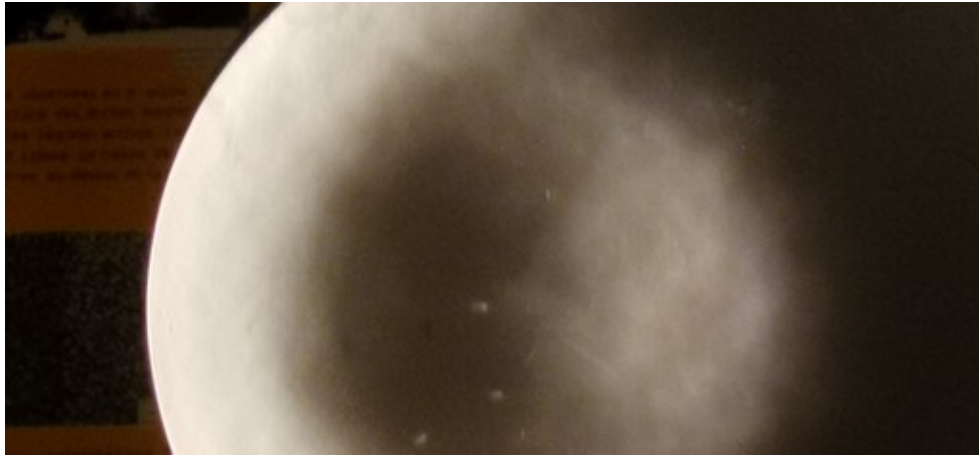


Fig 20 : image finale au Foucault. Noter les piqûres qui n'ont pas pu être éliminées.

Argenture

L'argenture est une opération chimique.

⇒ **Ne pas s'aventurer sans toutes les précautions d'usage lors de la manipulations de produits chimiques corrosifs.**

L'expertise de notre président, Michel Esteves, chimiste de son état, nous a été précieuse. Toutes les précautions d'usage doivent être suivies méticuleusement. L'opération utilise des produits dangereux, tels que l'acide nitrique pur. Un défaut de nettoyage, de dosage ou une manipulation malencontreuse et tout est à refaire.

Il existe plusieurs recettes, chacune avec des produits équivalents mais qui suivent les mêmes étapes. Nous nous sommes référés au livre de Jean Texereau. La première d'entre elles est prépondérante. C'est le nettoyage de la surface optique **à l'acide nitrique pur, voire fumant (danger!)**.



Fig 21 : argenture. Noter le précipité d'argent (noir)

Après avoir constitué le bain de départ contenant du nitrate d'argent, plongé le miroir sur des cales, procédé à l'opération de réduction finale en faisant basculer ce dernier sur ses cales pour bien agiter le bain, un précipité foncé apparaît et une fine couche d'argent se dépose sur le verre.

Au sortir du bain, il convient de bien rincer le miroir sans toucher à l'argenture qui a besoin d'un peu de temps pour adhérer complètement. Il reste un léger voile bleuâtre ou même quelques petites taches. On peut atténuer ces défauts inévitables en passant du rouge d'Angleterre avec une peau de chamois naturelle. Ce dernier point est très délicat et nous n'y sommes parvenus que très médiocrement, décollant l'argenture par endroits.



Fig 22 : Miroir fini !

Conclusion

Après de longs mois d'efforts et de patience, en pleine pandémie de Covid, nous avons un miroir de bon aloi de 215 mm de diamètre, de 1000 mm de focale, doté d'une surface réfléchissante en argent d'aspect correct. Les mois suivants ont été consacrés à la construction d'un télescope de type Dobson pour tester notre

chef d'œuvre. Quelques planches d'aggloméré mélaminé, quatre manches à balai métalliques pour les tubes du Truss, quelques vis et un porte oculaire de récupération et le tour est joué.

Le nouvel instrument de la SAP a été testé en condition réelle sur le ciel du Sud Toulousain sur le site d'Esperce. Le résultat a été jugé très satisfaisant. Les testeurs ont rapporté que l'image visuelle obtenue était comparable, voire meilleure, qu'avec un 300 mm du commerce !



Fig 23 : le nouveau membre des instruments de la SAP !

Fort de cette expérience, deux des membres de l'association se sont lancés dans un 400 mm. D'après leurs dires, il s'agit d'une tout autre histoire ...

Quelle que soit votre ambition, la taille d'un miroir est une aventure technique et humaine enrichissante mais à la portée de tous et vous êtes les bienvenus ...