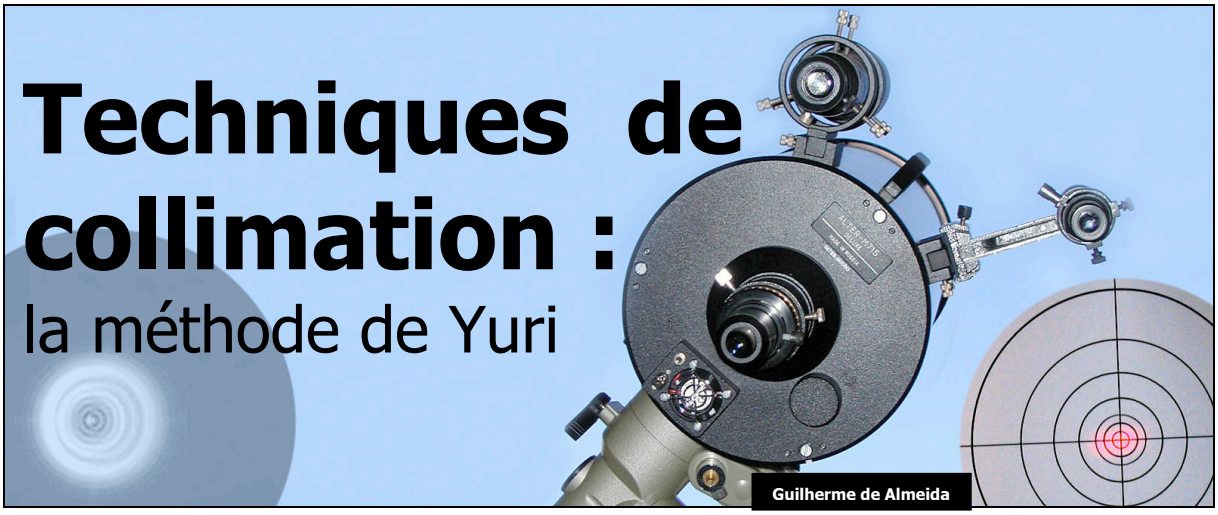

Guilherme de Almeida
g.almeida@vizzavi.pt

Traduit par J. Sérot (jocelyn.serot@wanadoo.fr)

1. Description du problème

La collimation d'un télescope, quelle que soit sa configuration optique, est une procédure itérative, ayant pour objectifs:

i) d'annuler la coma sur l'axe optique
ii) de garantir que la condition précédente se vérifie dans les positions intrafocale et extrafocale
iii) de faire coïncider le centre du champ de pleine lumière, dans le plan focal, avec le centre du champ de l'oculaire, ou du dispositif de capture d'image (CCD, film photographique, etc.).

"Annuler la coma" signifie ici s'arranger pour que l'image d'une source lumineuse ponctuelle - par exemple d'une étoile, naturelle ou artificielle -, légèrement défocalisée, apparaisse sous la forme d'anneaux de diffraction concentriques et réguliers. Toute évaluation de l'état de la collimation exige que l'image stellaire soit évaluée *seulement* quand elle est placé dans le centre du champ de l'oculaire. La collimation d'un télescope est facile lorsqu'une seule surface optique est à régler : elle s'opère en jouant sur la position et l'inclinaison de cette surface jusqu'à satisfaire la condition (i), en utilisant en général une étoile, naturelle ou artificielle. Si toutes les autres composante optiques du télescope sont par ailleurs collimatées, les conditions (ii) et (iii) sont alors automatiquement satisfaites. La collimation d'un système dans lequel plus d'une surface optique est réglable est plus délicate et peut se révéler laborieuse et frustrante, dans la mesure où l'ajustement d'une composante se répercute parfois dans l'ajustement des autres composantes. La collimation globale peut converger jusqu 'à une situation pratiquement excellente, ou se dégrader au point de sortir du contrôle de l'opérateur. De fait, aligner une composante en fonction d'une autre peut conduire à des désalignements qui peuvent être problématiques, à moins que l'opérateur ne soit méthodique et soigneux. D'où l'intérêt d'une technique permettant de collimater indépendamment (et d'une manière systématique) une des composantes optiques d'un télescope, sans que l'opérateur n'ait à se préoccuper de l'alignement des autres composantes. Cet article présente une telle technique.

2. Le vecteur de coma et les stratégies de décision

Quel que soit le type de télescope à collimater, nous devons toujours commencer par identifier le "vecteur de coma", ou "axe de coma". Comme illustré sur la Fig. 1. ce vecteur indique la direction selon laquelle l'ombre du miroir secondaire est décentrée. C'est dans cette direction, et seulement dans celle-ci, que l'image se doit déplacer lorsqu'on agit sur les vis de collimation. Sur la Fig. 1, le vecteur de coma est orienté arbitrairement dans le sens indiquant la « queue » de la figure de coma. La méthodologie efficace de collimation consiste à agir sur les vis de collimation afin de déplacer

l'image au long de cette ligne droite [EF], dans le « bon sens ». Ce « bon sens » dépend de la formule optique et du miroir que l'on est en train de collimater (primaire ou secondaire). Mais dans tous les cas, le déplacement observé devra se faire selon l'axe [EF] (il faut donc exclure les actions sur les vis de collimation conduisant à un déplacement selon l'axe[CD]).

3. Procédures classiques

Nous allons maintenant nous concentrer sur les télescopes de Cassegrain (dans leurs deux principales variantes : Maksutov-Cassegrain et de Schmidt-Cassegrain). Dans le cas des télescopes Schmidt-Cassegrain, le miroir primaire est en général aligné de manière permanente en usine; le secondaire est centré d'origine et la collimation se réduit à agir à sur le secondaire comme indiqué sur la Fig. 1-2. Le primaire étant collimaté d'origine, la collimation du secondaire peut se faire indifféremment en position intrafocale ou extrafocale.

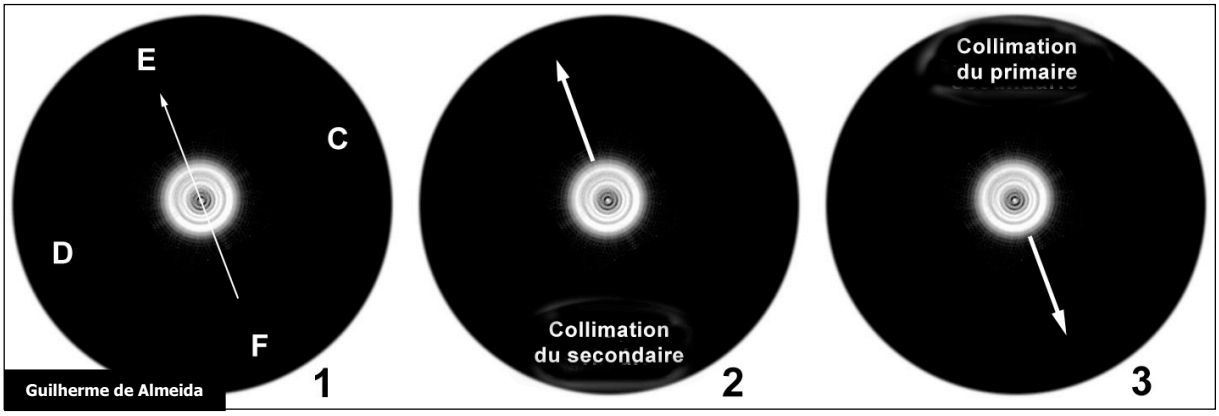

Fig. 1. Méthodologie de la collimation dans le cas d'un télescope Maksutov-Cassegrain, dans lequel le primaire et secondaire sont tous les deux collimatables. **1** - identification du vecteur de coma : l'excentrement de l'ombre du secondaire se produit dans la direction de la ligne droite qui passe par E et F, dans le sens F->E (le sens du vecteur de coma a été arbitrairement choisi); **2** – sens dans lequel l'image doit être déplacée (au moyen des vis de collimation) dans le cas de la collimation du secondaire ; **3** – sens dans lequel l'image doit être déplacée (au moyen des vis de collimation), dans le cas de la collimation du primaire. Les images 1 et 2 sont aussi applicables aux télescopes Schmidt-Cassegrain.

En général, pour un instrument d'ouverture *D* (en millimètres), on commence avec un grossissement *D*, puis 2*D* et enfin, si la turbulence l'autorise, on termine avec 3*D*. On défocalise de moins en moins à chaque niveau. Au niveau 3*D*, on s'assure, sur l'image focalisée cette fois, que les anneaux de diffraction entourant le disque d'Airy sont réguliers et uniformément éclairés. A ce niveau, les vis de collimation du secondaire doivent être tournées d'une petite fraction de tour (moins de 1/8eme), et de telle sorte que l'image se déplace cette fois dans le sens de la fraction d'anneau la plus brillante (c'est-à-dire, en s'éloignant de la partie la plus sombre de l'anneau, si celui-ci n'est pas uniforme). Il est important qu'au final les trois vis soient modérément mais uniformément serrées, si l'on veut que la collimation « tienne » dans le temps (la stabilité de la collimation dépend en fait de nombreux paramètres mécaniques que nous ne pouvons étudier plus avant dans cet article).

Pour beaucoup de télescopes Maksutov-Cassegrain les miroirs primaire et secondaire sont tous les deux collimatables. Comme indiqué plus haut, la collimation d'un tel système peut alors se révéler laborieuse, car les actions sur un des miroirs ont des conséquences sur la collimation de l'autre. Une démarche itérative – collimation du primaire, puis retouche du secondaire, puis retour au primaire, etc. – converge alors normalement mais peut aussi diverger et conduire à une situation où les deux miroirs sont totalement désalignés, laissent l'opérateur désemparé. C'est le cas avec les télescopes Maksutov-Cassegrain dotés de deux miroirs ajustables, et aussi le cas de la plupart des télescopes Cassegrain dans leurs diverses variantes.

En pratique, la procédure itérative est la suivante : on commence par identifier la direction du vecteur de coma (cf Fig. 1-1) dans l'image légèrement défocalisée en extrafocale. Puis, toujours sur cette image extrafocale, on élimine la coma en agissant sur les vis de collimation du secondaire (Fig. 1-2). On observe ensuite l'image défocalisée en intrafocal et on élimine la coma en agissant dans la

collimation du miroir primaire (Fig. 1-3). On répète ce cycle trois ou quatre trois fois, avec des grossissements croissants et une défocalisation décroissante jusqu' à obtenir la collimation complète évoquée plus haut. Dans cette manière de travailler, pour chaque direction de défocalisation (intrafocale ou extrafocale) on agit toujours sur le même miroir (primaire ou secondaire). On peut bien sur intervertir le rôle des images intrafocales et extrafocales (utiliser la première pour collimater le primaire et la seconde pour collimater le primaire) mais il faut être méthodique et se tenir à ce schéma. Par exemple, si on commence à utiliser l'image intrafocale pour collimater le primaire, il ne faut surtout pas, en cours de route, utiliser cette même position intrafocale pour collimater le secondaire, sous peine de s'éloigner irrémédiablement de la solution. Il est malheureusement très facile de se tromper (surtout si on opère de nuit, dans l'obscurité et le froid …).

Si le primaire est déjà collimaté, l'obtention d'une image extrafocale concentrique (en faisant appel à la collimation du secondaire) garantit que l'image intrafocale sera elle aussi concentrique. Ceci signifie que, en présence d'un primaire bien collimaté, la collimation du secondaire peut faire indifférentement sur l'image intrafocale ou extrafocale. On comprend donc l'intérêt d'une méthode qui puisse garantir qu'un miroir est collimaté indépendamment de l'état de l'autre miroir. Savoir qu'un des deux miroirs est déjà collimaté – le primaire par exemple – simplifie grandement la collimation de l'autre. C'est l'objectif de cet article.

4 La méthode de Yuri

La méthode qui se décrit ensuite m'a été suggérée il y a environ 7 ans par Yuri Petrunin, le président de TEC (Technical Engineering Telescopes). L'auteur (inventeur) original de l'idée n'est pas connu de manière certaine, mais je désignerai cette technique comme la « méthode de Yuri » dans la mesure où elle m'a été communiquée par Yuri Petrunin. Je ne revendique pas la paternité de l'idée mais seulement celle de la réalisation pratique – et les solutions originales qui sont associées à cette réalisation - décrite ici qui s'en inspire.
Le seul obstacle à la mise en œuvre pratique de la méthode s'est révélé être la difficulté à obtenir du matériel capable de donner le niveau de précision requis. Cet obstacle explique le laps de temps qui s'est écoulé entre la communication de l'idée par Yuri P. et la construction du dispostif décrit ici. Je détaillerai les problèmes rencontrés et comment les contourner, afin d'éviter au lecteur de refaire les mêmes erreurs.

La base du système de Yuri est un dispositif autorisant la rotation du tube optique du télescope autour de son axe géométrique. Son but est la collimation rigoureuse du miroir primaire. Il s'agit essentiellement d'un banc de rotation qui permet d'aligner le miroir primaire avec précision (Fig. 2) en utilisant un faisceau laser.

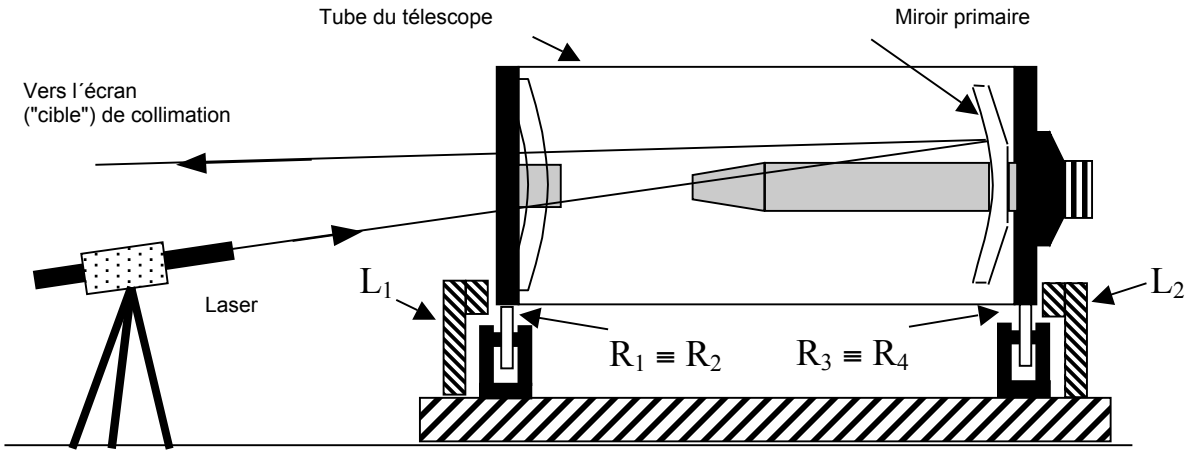

Fig. 2. Principe de la méthode de Yuri. Le laser peut être un simple pointeur laser pour conférencier ou un laser de collimation. L1 et L2 sont des butées, à l'avant et à l'arrière du tube. Guilherme de Almeida, 2007.

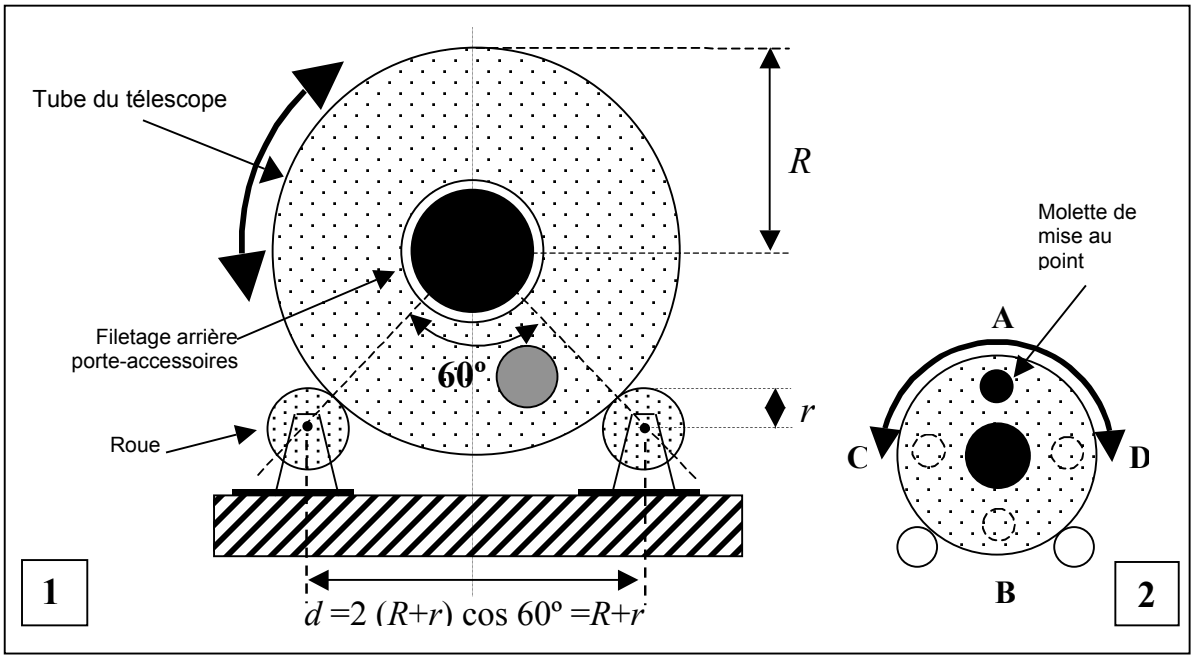

Fig. 3. Divers aspects à considérer dans la collimation du miroir primaire par la méthode de Yuri. Guilherme de Almeida, 2007.

Ce dispositif permet de réaliser l'alignement d'une des composantes optiques (le miroir primaire) indépendamment de l'autre. Une fois cet alignement fait, et seulement après, l'opérateur pourra se concentrer sur celui de la seconde composante (le miroir secondaire), ce qui répond au souhait exprimé plus haut.
Le principe de la méthode de Yuri consiste à faire tourner le tube du télescope, posé sur quatre roues. Pour cela, le tube du télescope est maintenu dans une position approximativement horizontale. Un laser rouge, fixé par rapport au sol est dirigé vers l'intérieur du tube, de telle manière que le faisceau lumineux traverse le ménisque correcteur, atteigne le primaire, se reflète sur celui-ci, ressorte par le ménisque correcteur - sans toucher le miroir secondaire – et frappe finalement un mur sur lequel une « mire » peut être placée. Il convient que le mur soit au moins à 3 mètres du primaire, mais il est préférable d'utiliser des distances plus grandes, de l'ordre de 4 à 6 mètres. Nous faisons alors tourner le tube sur les roues du banc. Si le miroir primaire est bien collimaté, le point d'impact du laser sur le mur se maintiendra immobile. Si le primaire est décollimaté, même très légèrement, ce point décrira un cercle sur le mur. Le diamètre de ce cercle dépend du degré de décollimation : plus il est petit, meilleure est la collimation du miroir primaire. L'idée est alors agir sur les vis de collimation du primaire afin de réduire progressivement le diamètre de cette cercle. Pour cela on note la position du point d'impact sur le mur pour deux positions du tube séparées par des rotations de 180º [Fig. 2-2]. On agit alors sur les vis de collimation du primaire afin de placer le point lumineux au milieu du segment joignant ces deux positions extrêmes. On corrige en fait seulement la moitié de l'erreur à chaque opération. Par exemple, comme indiqué sur la figure 2-2, on corrige d'abord en utilisant les positions "A" et "B", puis ensuite les positions "C" et "D". On poursuit jusqu'à annuler le déplacement du point lumineux sur le mur. En pratique, la méthode devient délicate à appliquer quand le déplacement du point lumineux est plus petit que 4 mm. La sensibilité de la méthode est néanmoins très grande. En effet, si le miroir est incliné d'un angle α par rapport à sa position de référence (collimaté), le faisceau réfléchi est dévié d'un angle 2α et cet angle 2α détermine le rayon angulaire du cercle décrit sur le mur par le faisceau réfléchi. Comme le mur très est éloigné du primaire, même un petit rayon angulaire se traduit par un grand rayon linéaire. L'utilisation d'une mire, comme illustré sur Fig 7, permet de détecter de petits déplacements de la tache lumineuse sur le mur qui passeraient inaperçues sur un mur lisse et sans aucune marque de référence.

Cette technique permet, en substance, d'aligner l'axe optique du miroir primaire avec l'axe mécanique du tube, en les faisant coincider ; autrement dit, et de manière équivalente, elle garantit que le plan qui contient le bord du primaire est parallèle au plan qui contient le bord du ménisque de Maksutov. Strictement parlant il n'y a équivalence que si trou central du miroir – par lequel celui ci est relié au

tube – est bien centré et si le miroir n'a pas d'erreur prismatique (l'erreur prismatique est l'angle que fait le plan qui contient la face arrière du miroir avec le plan qui contient le bord de sa face frontale ; si n'y a pas d'erreur prismatique, l'épaisseur marginale du miroir est égale sur tout son bord). En pratique, l'erreur prismatique résiduelle est très faible dans les bonnes réalisations (inférieure à une minute d'arc), et le décentrement du trou central est au pire des cas de l'ordre d'une petite fraction de millimètre.

Par ailleurs, les roues utilisées pour faire tourner le tube sur le banc doivent être bien être centrées et « bien rondes ». Autrement dit, leur bord ne doit pas « monter et descendre » quand elles tournent sur leur axe (Fig. 4). Comme il n'existe pas de roue parfaite, la distance 2*e* indiquée dans cette figure ne devra pas dépasser 1/8ème de millimètre. Cette précaution peut sembler inutile, mais on doit comprendre ce qui arrive, au pire cas, lorsque les deux roues à l'avant du tube se retrouvent en position « haute » et que, simultanément, les deux roues arrière sont en position « basse ».
Afin de maximiser la distance entre les deux paires de roues, on s'arrangera, dans la mesure du possible, pour les roues avant roulent sur l'anneau frontal (barillet du ménisque) et les roues arrière sur l'anneau correspondant arrière (qui tient le barillet du primaire).

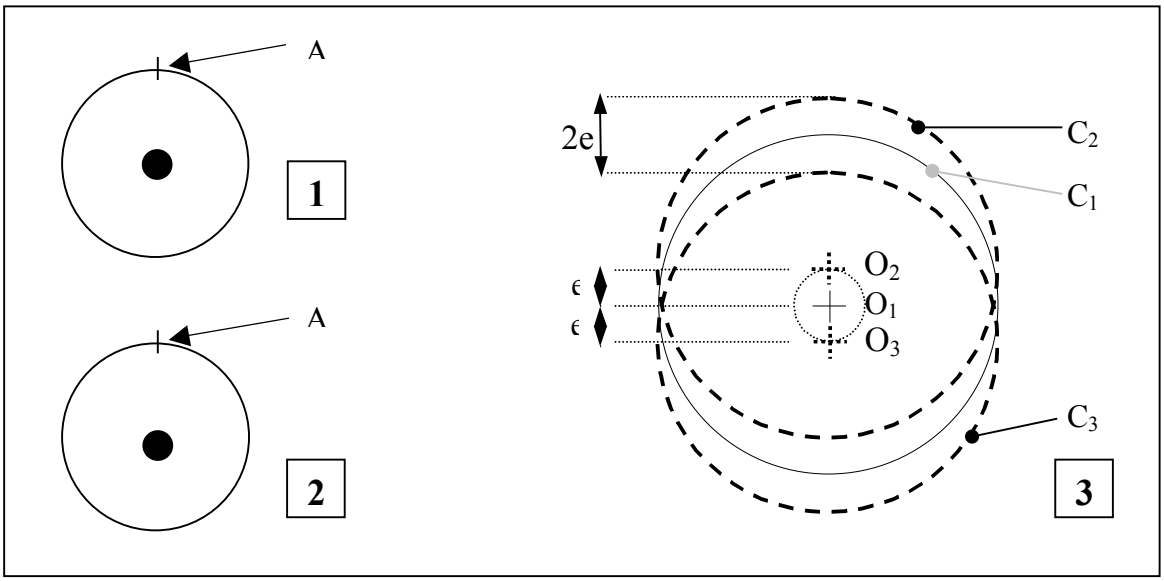

Fig. 4. Quelques aspects liés aux caractéristiques des roues : **1** – dans une roue idéalement parfaite, le centre de rotation (marqué en noir) et le centre géométrique coïncident et, donc, le point A de la circonférence ne monte ni ne descend pendant la rotation; **2** - une roue excentrique, dont l'axe de rotation est décalé par rapport au centre géométrique, le point A de la circonférence monte et descend successivement quand la roue tourne; **3** – dans une rotation excentrique, O1 est le centre géométrique et O2 le centre de rotation O2. Lors de la rotation, le point O2 gravite autour d'O1 et le point supérieur de roue oscille entre deux positions extrêmes distantes de 2*e*, soit deux fois la distance entre O1 et O2. Quand le point O passe par la position supérieure (notée O2), le bord de rotation est C2. Quand le point O2 passe par la position inférieure (notée O3), le bord de rotation est C3. Guilherme de Almeida, 2007.

5. Aspects essentiels de la construction

Le système de Yuri, bien que simple dans son principe, pose en fait quelques défis en pratique, dès lors que l'on souhaite faire une construction avec la précision nécessaire. D'une part, il faut choisir des roues avec le diamètre ajusté, en général entre 2 cm et 3,5 cm. L'espacement entre les roues n'est pas critique, mais on s'arrangera pour que celles-ci fassent un angle d'environ 60° par rapport à l'axe du tube du télescope (les centres des deux roues et le centre de la section transversale du tuyau définiront un triangle approximativement équilateral). Les roues doivent avoir par ailleurs une excentricité très faible ; il convient donc d'utiliser des roulements à billes ou des roues en matière plastique de qualité montées sur des roulements à billes. Si on utilise des roulements à billes, il est nécessaire de disposer d'un système de fixation permettant de fixer ceux-ci au banc en maintenant leur axe fixe (de tels dispositifs de fixation sont très difficiles à trouver dans le commerce et ne sont pas faciles à construire avec la précision requise). La précision mécanique de la réalisation est pourtant essentielle : il serait illusoire de vouloir collimater précisément un miroir primaire si, à cause

d'imperfections du système de roulement, l'oscillation du tube atteignait 10 minutes d'arc pour un tour complet du tube. Cette précision dépend principalement de l'excentricité des roues et de leur bonne circularité; elle suppose aussi que le tube du télescope lui-même est parfaitement rond , mais ce point ne pose généralement pas problème pour les tubes du commerce.

On peut aussi citer les problèmes liés au contact des roues avec le tube. De ce contact peuvent résulter des dommages à la peinture du tube si les roues sont métalliques; on peut s'en affranchir en enrobant la circonférence extérieure des roues avec du ruban adhésif (un seul tour, sans superposition et surtout sans espacement (l'épaisseur typique du ruban adhésif dépend des marques, mais est typiquement de l'ordre de 0,060 mm, avec une excellente uniformité.

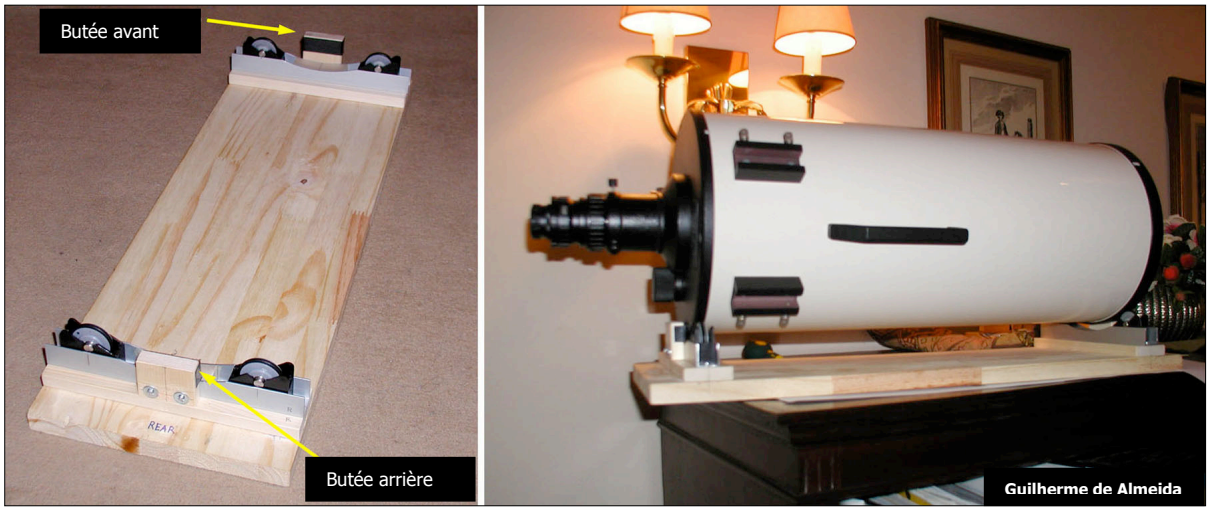

Fig. 5. Aspect global du dispositif, on voit ici les roues (grises), leurs supports (noirs), le profilé en "U", les règles en bois (servant de réhausse) et les pattes empêchant la translation longitudinale. Guilherme de Almeida (2007)

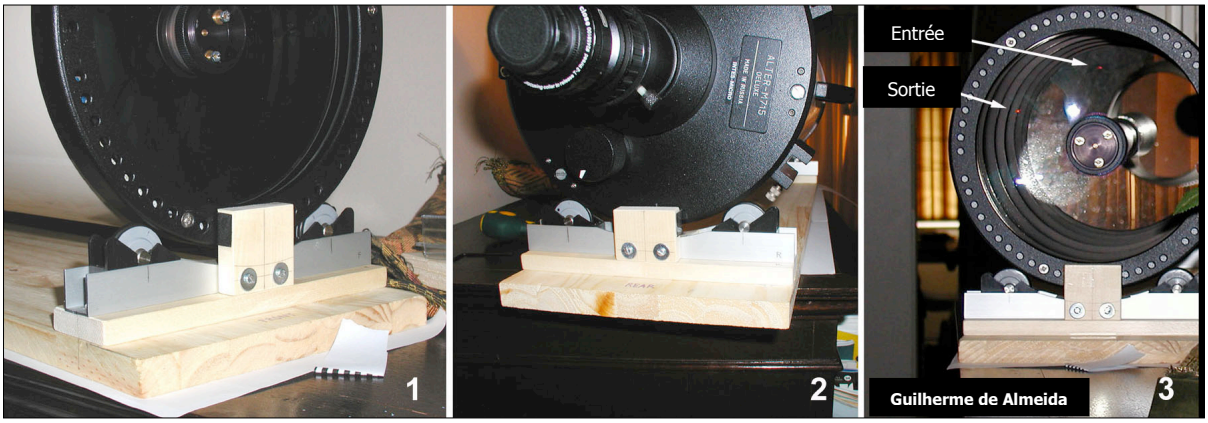

Fig. 6. Différents aspects du dispositif de collimation en action. 1- partie frontale ; 2- partie arrière ; 3- entrée et sortie du faisceau dans le tube (le point d'incidence, dans le miroir primaire lui-même, n'est pas visible dans cette photo). Guilherme de Almeida (2007)

Trouver des roues appropriées à ce projet n'a pas été facile. Les roues vendues pour déplacer les meubles et les chaises sont très excentriques et ne conviennent absolument pas; les roulements à billes sont vendus sans système de fixation; les roulements pour tiroirs ont de la matière plastique à la périphérie, ce qui convient *a priori*, mais ils sont trop petits, et présentent en outre un jeu important sur l'axe. Après beaucoup de recherches, j'ai opté pour des roues équipant des fenêtres coulissantes, de 30 mm de diamètre environ, déjà montées dans des supports de nylon noir (achetées chez AKI/Leroy-Merlin). Elles sont en matière plastique dure et tournent sur des roulements à billes. Elles ne sont pas toutes bonnes et j'en ai sélectionné 4 parmi un échantillon de 20. J'ai aussi mesuré soigneusement la double excentricité (la valeur 2*e* mentionnée plus haut) avec un pied à coulisse sensible à 0,01mm. J'ai aussi repéré, sur la périphérie de chaque roue, la position correspondant au

niveau le plus haut [Fig. 4-3], afin de pouvoir les faire tourner « en phase » et de minimiser ainsi les conséquences des petites excentricités. Une coupe oblique, dans le support noir des roues, faite avec un cutter (en otant la roue temporairement de son support) permet d'éviter que le tube ne soit abimé par les supports des roues. Cette coupe peut être vue sur les figures 5 et 6, du côté gauche. J'ai aussi utilisé un "O-ring" de dimension ajustée comme « pneu » autour des anneaux métalliques à l'extrémité du tube, ce qui évite d'endommager la peinture. Ces anneaux ont une excellente uniformité en épaisseur. Les blocs des roues ont été montés à l'intérieur d'un profilé en U en aluminium, de largeur appropriée (20 mm extérieur) l'ajustement se faisant avec des des entretoises de carton uniformes [Fig. 6-1]. Ce profilé a été monté sur une règle épaisse en bois, afin de placer les roues suffisamment hautes de telle sorte que le tube puisse tourner sur 360° sans que sa poignée de support ne constitue un obstacle à cette rotation. Il faut aussi limiter le mouvement longitudinal du tube afin d'éviter les chutes intempestives du tube du banc rotatif. Sur la figure 5, on peut voir les pattes en bois (butées) qui assurent cette fonction.

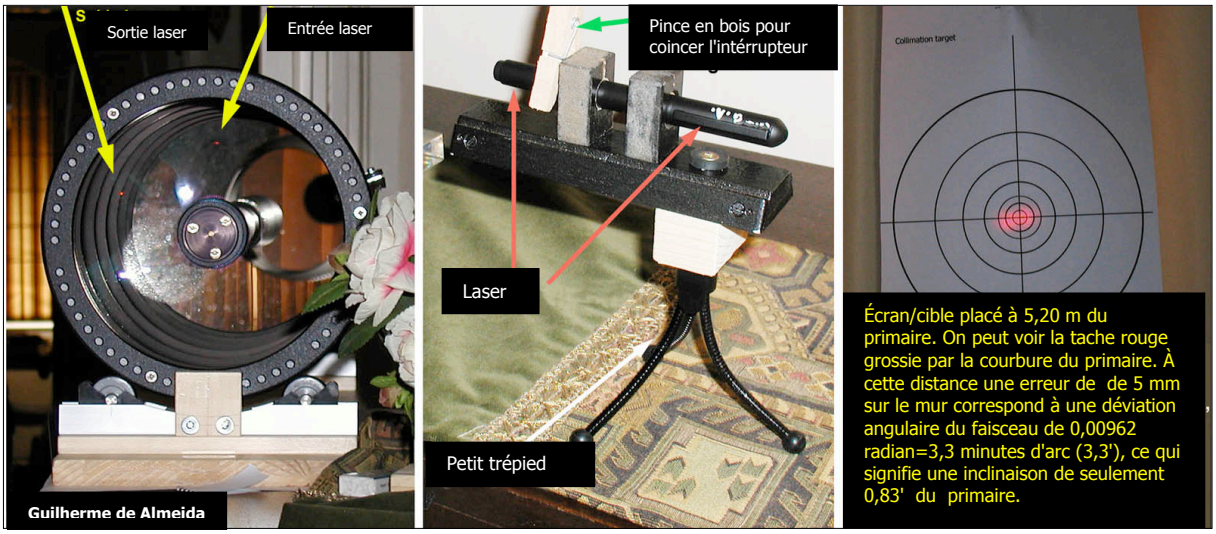

Fig. 7. Différents aspects du dispositif de collimation. Guilherme de Almeida (2007).

6. Conseils d'utilisation

Comme indiqué sur texte accompagnant la photo de la figure 7 (à droite), dans mon cas, l'écran a été placé à 5,20 m du primaire. La point lumineux du laser sur le mur apparaît étalé à cause de la courbure du primaire. À cette distance, une erreur de 5 mm (entre les positions extrêmes du point lumineux) correspond à une déviation angulaire de 0.00962 radian, soit 3,3 minutes d'arc (3,3 ') donc 1,65' pour la position moyenne. Ceci correspond à une inclinaison du miroir primaire de seulement 0,83 minutes d'arc. Pour faciliter la mesure des petits déplacements du point lumineux sur le mur (qui passent inaperçus sur un mur lisse et sans référence), j'ai utilisé une mire faite à l'ordinateur imprimée sur une vulgaire feuille A4. Pour que la tache rouge n'apparaisse pas trop grande sur cette mire, il vaut mieux ne pas placer le laser trop éloigné du ménisque (je l'ai placé à une distance d'environ 50 cm). J'ai utilisé un vulgaire pointeur laser, classiquement utilisé par les conférenciers. Ce modèle de laser est généralement doté d'un interrupteur on-off à pression, ce qui impose d'appuyer continuellement. Pour cela, j'ai utilisé une simple pince à linge : simple et efficace. Le laser, une fois positionné, ne devra pas être déplacé par rapport au banc rotatif.
La mode opératoire qui s'est révélé le plus pratique consiste à comparer les positions de la petite tache rouge sur le mur, par rapport à un point de référence, pour deux positions du tube écartées de de 180º. Cette approche est illustrée sur la Fig. 3-2. En prenant pour référence une partie du tube - par exemple le bouton de focalisation – j'ai placé cette partie « à 12 h » [Fig. 3-2, A] et j'ai noté la position de la tache lumineuse sur la mire fixée au mur. En tournant le tube de 180º [Fig. 3-2, B], j'ai noté à nouveau la position de la tache lumineuse, qui s'est déplacée un peu. J'ai alors agi sur les vis de collimation du primaire afin d'amener la tache au milieu du segment joignant les deux positions

notées précédemment. Cette opération est ensuite répétée pour les positions C et D du tube, comme illustré sur la Fig.3, à droite. On itère ensuite ces deux étapes, avec une déviation moindre à chaque fois. A cause de l'étalement de la tâche, il est difficile d'estimer des déviations inférieures à 4-5 mm. On cherche donc, dans les étapes ultimes à assurer l'immobilité de la tache.

La collimation du secondaire se fera ensuite sur étoile, naturelle ou artificielle. Et le télescope restera alors bien collimaté. On peut aussi, éventuellement, après la collimation du primaire, faire une pré-collimation du secondaire (à perfectionner ultérieurement sur une étoile). Pour cela, on insère un bon laser de collimation dans porte-oculaires (et non un simple pointeur laser) et on agit sur les vis de collimation du secondaire de telle sorte que le faisceau réfléchi par le secondaire revienne centré à l'orifice de sortie du laser. Mais cette procédure devra de toutes façons être confirmée et affinée sur une étoile, par la méthode classique. Ceci sans que l'on ait à retoucher au primaire, ce qui montre l'intérêt de la méthode de Yuri.

Le banc optique décrit ici est évidemment spécifique d'un modèle de télescope et, à moins d'une grande similitude dimensionnelle, il faut en construire un pour chaque modèle, ou, pour le moins, adapter certaines cotes. Il est facile de s'adapter à un tube plus court ou plus long (en écartant/ rapprochant les règles portant les paires de roues). La modification pour s'adapter à un tube de diamètre différent peut être plus lourde (car il faut éventuellement modifier l'écartement des roues sur chaque paire).

7. Conclusion

Plusieurs variantes du système de Yuri ont été construites au Portugal par quelques observateurs, parmi lesquels Joaquim Rosa, Grom Matthies et Rui Tripa (de la société Perseu). La Fig. 8 montre certaines de ces réalisations, y compris le modèle original de Yuri Petrunin.

Fig. 8. Différentes réalisations du dispositif de Yuri. 1- l'original, utilisé dans l'atelier d'optique de TEC (Telescope Engineering Company) ; 2- réalisation de Joaquim Rosa ; 3- réalisation de l'observateur nord-américain Jason Spencer, qui n'utilise pas de roues (les bords du banc en contact avec le tube ont été enduits de feutre, afin de ne pas abimer la peinture du tube). Images sous la responsabilité des auteurs respectifs.

J'ai obtenu excellents résultats avec ce dispositif pour la collimation de mon télescope Maksutov-Cassegrain, Intes-Micro M715 Deluxe, de *D*=180 mm *f*/15. Chacun est libre d'utiliser les plans donnés ici, mais je ne peux prendre aucune responsabilité en ce qui concerne la qualité de la réalisation que chacun peut faire, ou garantir aucun résultat pour une réalisation particulière qui s'en inspirerait.

Références:
ALMEIDA, GUILHERME DE —*Telescópios*, Plátano Editora, Lisboa 2004.
Voire aussi les liens suivants:
http://www.platanoeditora.pt/index.php?q=C/BOOKSSHOW/15
http://astrosurf.com/re/indice_telescopios.pdf
http://astrosurf.com/re/capa%20final_telescopios_small.jpg