

La fente Star'Ex GEN2

Projet Sol'Ex/Star'Ex : <http://www.astrosurf.com/solex>

Christian Buil, octobre 2024

1. Introduction

Jusqu'à la fin de l'année 2024, les fentes équipant les spectrographes Star'Ex (qu'il s'agisse des versions à haute ou basse résolution, ou encore infrarouges) étaient conçues pour les instruments de la gamme Shelyak Instruments (<https://www.shelyak.com>), tels que le Lhires III et l'Alpy 600, qui ont précédé l'arrivée du « Star Explorer ».

À partir de cette date, vous aurez la possibilité d'utiliser une fente spécifiquement conçue pour Star'Ex, appelée fente Star'Ex de génération 2 (GEN2). Cette note en décrit les particularités et sert également de notice d'utilisation.



Figure 1. Un ensemble de fentes utilisables avec Star'Ex. A gauche, une fente initialement conçue pour le spectrographe Alpy600. Au centre, une disposition comportant 4 fentes de largeurs distinctes, au départ employée avec les spectrographes Lhires III et LISA de Shelyak. A droite, la nouvelle fente Sar'Ex GEN2 dans son support réalisé en impression 3D.

Notez qu'il est possible d'utiliser la fente Star'Ex GEN2 sur d'autres modèles de spectrographes, peut-être même ceux de votre propre conception.

La fente Star'Ex GEN2 est disponible auprès de la société Shelyak Instruments :

<https://www.shelyak.com/produit/fente-starex-14-20-26-32/>

2. Présentation du système de fentes Star'Ex GEN2

Le système Star'Ex GEN2 se présente sous la forme d'une lame en silice fondue (quartz synthétique) de 16 millimètres de côté et de 2 millimètres d'épaisseur. Une des faces de la lame est recouverte d'une couche antireflet, tandis que l'autre est recouverte d'une couche de chrome opaque à la lumière, à l'exception d'ouvertures étroites correspondants aux fentes, gravées par une technique photolithographique de haute précision.

Sur ce substrat en silice, quatre fentes indépendantes sont disposées en carré, avec des largeurs de 14, 20, 26 et 32 microns. Un trou central de 25 microns de diamètre est également présent, prévu pour faciliter le réglage des spectrographes.

À l'extrémité de chaque fente, un élargissement d'un facteur 10 sur une longueur de 0,5 mm a été ajouté (voir figure 2). Cet élargissement a deux fonctions : (1) fournir plus d'informations sur les conditions d'utilisation de l'instrument (niveau de turbulence atmosphérique, rendement instrumental, qualité des réglages, évaluation de la réponse instrumentale) ; (2) permettre l'acquisition de données spectrophotométriques facilitant l'étalonnage des spectres en valeur de flux absolu.

Par ailleurs l'information sur la largeur des fentes est précisée dans les coins du substrat.

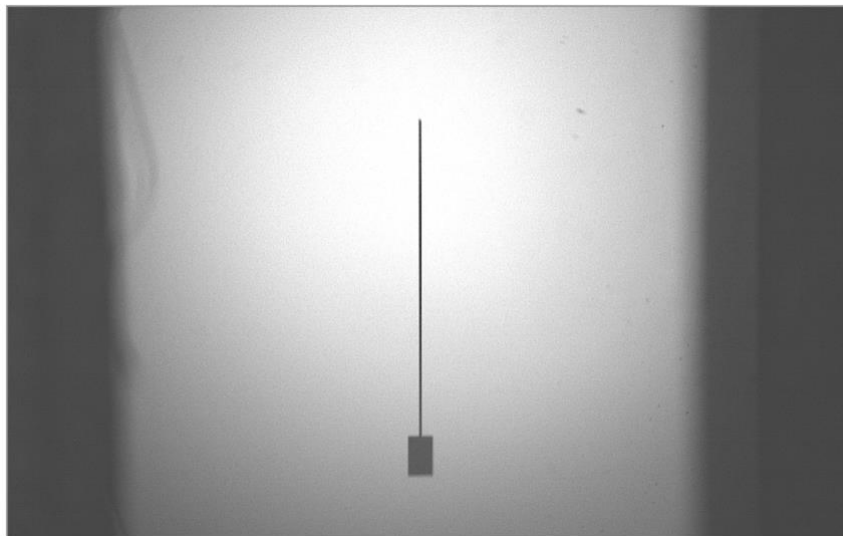


Figure 2. L'aspect de la fente de 32 microns de large, vue depuis une caméra de guidage à grand capteur (modèle ZWO ASI174MM Mini).

La figure 3 présente l'ensemble du système GEN2 pour Star'Ex. Il est constitué de la fente elle-même (les fentes pourrait-on dire), mais aussi d'un support spécifique donnant une inclinaison à 15° du plan de la fente et d'une bride de maintien.

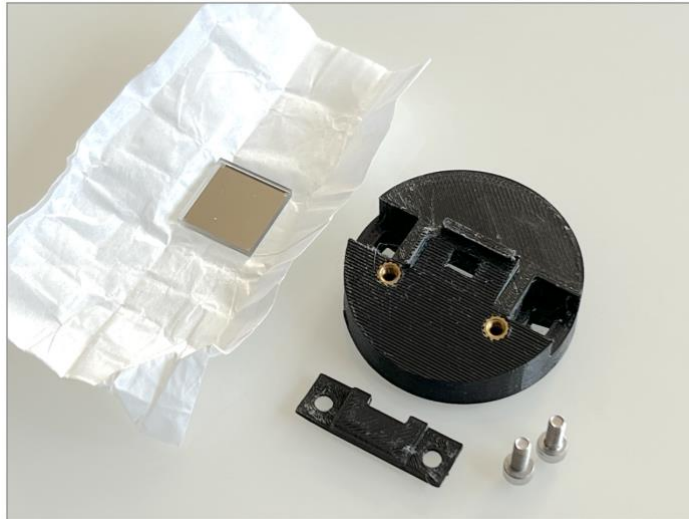


Figure 3. Vue d'ensemble du système GEN2.

3. Caractéristiques de la fente Star'Ex GEN2

Voici une énumération des apports de la fente GEN2 :

- La variété des largeurs de fente (14, 20, 26, 32 microns) permet de s'adapter à de nombreuses situations. Par exemple, la fente de 14 microns est idéale pour la spectrographie à très haute résolution spectrale avec une petite lunette ou un petit télescope. En revanche, la fente de 32 microns convient mieux à la spectrographie basse résolution avec un télescope de taille respectable, de 300 mm de diamètre typiquement. En outre, ces fentes sont suffisamment longues pour capturer dans de bonnes conditions le spectre d'objets ayant une grande surface angulaire, tels que les nébuleuses ou les comètes.
- La disposition de type "fente photométrique", avec un élargissement à l'une des extrémités de chaque fente sur une courte longueur de 0,5 mm, offre un diagnostic précis de l'instrument et permet un étalonnage absolu des spectres. Cela ouvre la voie à des applications professionnelles supplémentaires.
- La présence d'un trou central de 25 microns, bien que discrète, constitue une innovation majeure. Ce trou permet de régler le spectrographe sur une table de manière sûre et simple, sans avoir besoin d'un télescope ou d'un ciel étoilé. Le trou joue en effet le rôle d'une étoile artificielle. Dans la section suivante, nous montrons comment l'utiliser pour ajuster précisément la focalisation du collimateur de Star'Ex.
- La fente Star'Ex GEN2 est fabriquée en silice fondue. En plus de sa robustesse mécanique, ce matériau offre une transparence spectrale extrêmement étendue, dans l'infrarouge, mais aussi dans l'ultraviolet, jusqu'à des longueurs d'onde très courtes. Cela permet d'explorer, avec les spectrographes adaptés, des régions du spectre rarement observées par les amateurs, mais très riches d'un point de vue

astrophysique. Bien que Star'Ex ne soit pas spécifiquement conçu pour l'observation de l'ultraviolet, l'utilisation de la silice offre un gain, même modeste, autour de 375 nanomètres (l'extrémité raisonnablement atteignable du spectre dans le bleu avec notre instrument).

- La fente a une épaisseur de 2 millimètres, ce qui est sensiblement plus que les fentes précédemment utilisées sur Star'Ex. Ce choix vise à offrir un composant robuste, moins susceptible de se casser lors d'une mauvaise manipulation (bien que la prudence reste de mise, car il s'agit toujours de verre !). Les deux faces de la fente sont accessibles pour être nettoyées facilement. Du côté de la caméra de guidage, cette surépaisseur n'empêche pas d'observer les images parasites classiques dans le champ, comme c'est le cas actuellement, mais ces images sont plus larges, donc moins intenses que précédemment.
- Comme on l'a indiqué, la fente GEN2 peut s'employer sur des spectrographes stellaires autres que Star'Ex, ou encore sur des équipements de laboratoires divers. Par définition, cette fente est bien entendu compatible avec la version originelle de Star'Ex (V1), mais aussi la version retouchée par la société Azur3DPrint (V2). Seule une nouvelle pièce support est à fabriquer en impression 3D.

4. L'aide au réglage de Star'Ex

Lors du réglage d'un spectrographe Star'Ex, l'étape la plus délicate, mais aussi la plus importante, consiste à ajuster correctement la distance entre la fente et l'objectif collimateur. Nous allons apprendre à réaliser ce réglage en utilisant le trou central de la fente Star'Ex GEN2.

Pour effectuer cette opération, il vous faut une veilleuse au néon, qui produira de belles raies en émission autour de la région rouge de la raie H α . Par exemple :

<https://www.e44.com/eclairage-lampes/lampes-tubes/a-incandescence-miniature/a-fils-avec-resistances/lampe-neon-avec-resistance-220-volts-0.6ma-4x10mm-N76220.html>

Veillez à effectuer un câblage sûr, car ce type de lampe fonctionne sous 220 V.

Si vous ne disposez pas d'une telle lampe, vous pouvez peut-être en trouver une (voir figure 5) dans une multiprise équipée d'un voyant de contrôle de mise sous tension à base d'ampoule néon (à ne pas confondre avec les modèles équipés de LED, la lumière issue d'une lampe néon a tendance à vaciller, pas celle d'une LED). Placez alors votre multiprise devant l'entrée de Star'Ex... il faut parfois savoir improviser et oser avec les moyens du bord pour obtenir un résultat !



Figure 5. Une lampe néon permettant de régler Star'Ex se trouve peut-être à vos pieds !?

Commencez par éclairer l'entrée de Sol'Ex avec la lumière de cette lampe néon, après avoir recouvert votre coulant de 31,75 mm ou 50 mm (déjà installé) avec une épaisseur de papier calque pour servir de diffuseur. Un diaphragme simulant l'ouverture relative de votre futur télescope peut éventuellement être utilisé (voir figure 6).



Figure 6. Éclairement de l'entrée de Star'Ex avec une source néon.

Voyons la procédure en nous plaçant dans la situation de régler un spectrographe Star'Ex HR... totalement déréglé au départ.

Etape 1 : Montez la fente GEN2 sur le support #3, celui qui permet de positionner le trou au centre du champ du spectrographe (voir figure 7 et à l'annexe de cette note), puis installez l'ensemble dans le logement avant prévu dans Star'Ex.

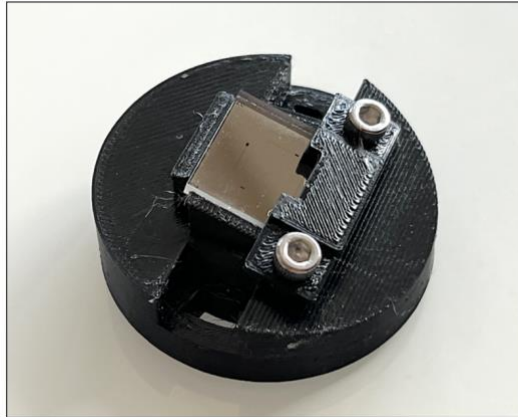


Figure 7. Fente Star'Ex GEN2 montée dans le support de réglage #3.

Etape 2 : Orientez le réseau de manière habituelle (avec la manette support) pour que la raie $H\alpha$ soit approximativement au centre du capteur.

Etape 3 : Capturez un premier spectre de la lampe néon. Le résultat sera probablement catastrophique : des images de raies totalement floues et très allongées, comme illustré dans la figure 8, et l'agrandissement de la figure 9. Dans un spectrographe bien réglé, l'image du point source que constitue le trou de la fente GEN2 devrait apparaître comme un point au niveau de chaque raie spectrale.

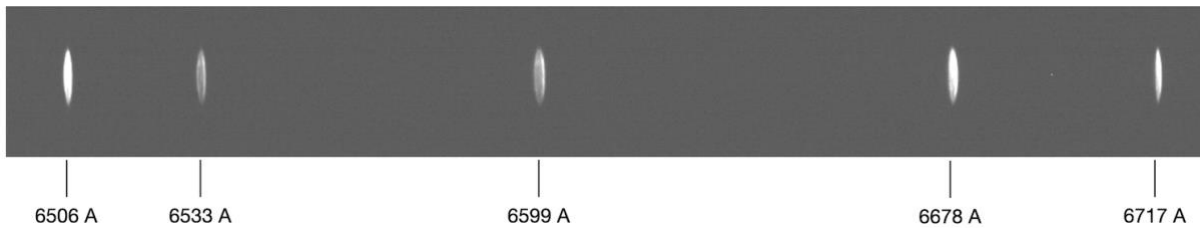


Figure 8. Aspect du spectre du néon au voisinage de la raie $H\alpha$ réalisé avec un spectrographe non réglé. La source est le trou de 25 microns de la fente Star'Ex GEN2.

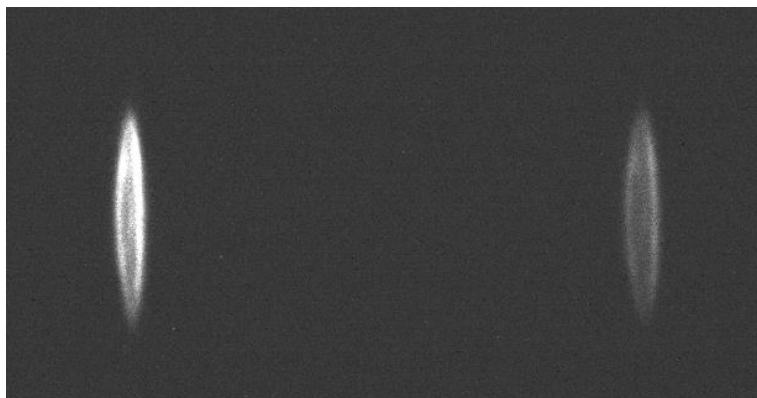


Figure 9. Détail du spectre du néon lorsque le spectre est obtenu avec un spectre non réglé, un mélange d'astigmatisme et de défocalisation.

Etape 4 : Agir sur le réglage de la focalisation caméra via le système hélicoïdal (figure 10) pour obtenir des raies bien étroites (figure 11). Ne vous occupez pas de la

forme en bâtonnet vertical, l'essentiel est que nos raies soient fines suivant l'axe spectral (axe horizontal dans les images).

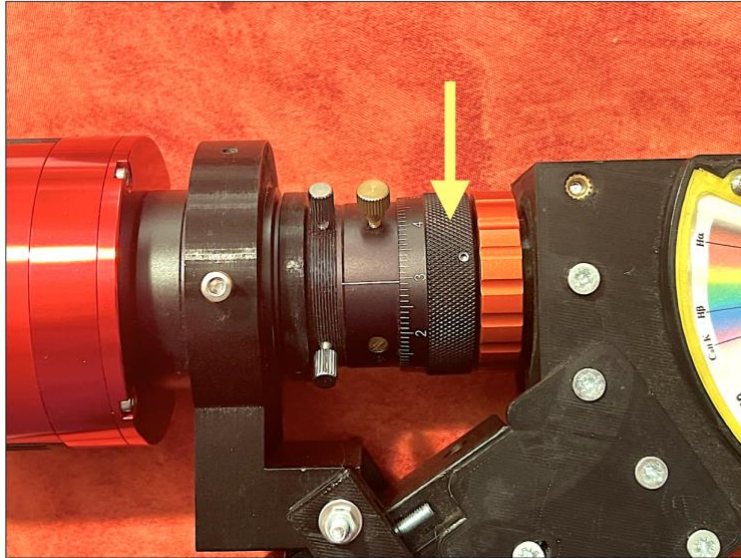


Figure 10. La bague du système hélicoïdal sert à régler la focalisation de la caméra.

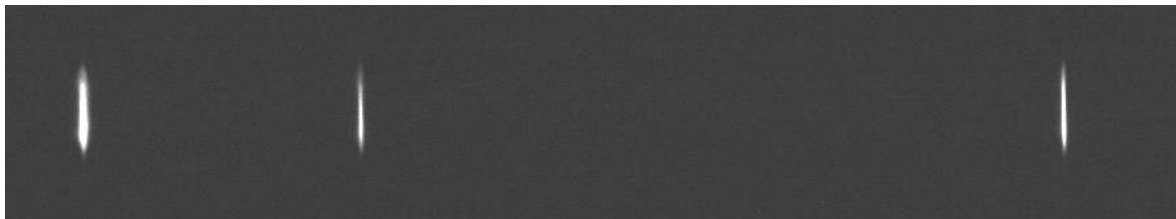


Figure 11. Le spectre du néon (centré autour de la raie $H\alpha$) après la focalisation de la caméra. Les raies deviennent étroites, mais toujours allongées, signe de la présence d'un fort astigmatisme.

Etape 5 : Déplacer le bloc collimateur après avoir desserré les vis de maintien (figure 12). Le but en agissant ainsi est de réduire petit à petit l'allongement vertical des raies (c'est-à-dire, l'astigmatisme) – voir figure 13.



Figure 12. L'ajustement de la distance de la fente au collimateur.



Figure 13. Par essais successifs, réduire la hauteur de la figure d'astigmatisme. Bien sûr, choisir le bon sens de déplacement du bloc pour améliorer l'image.

L'utilisation du système de déplacement fin du bloc collimateur introduit dans les dernières versions des boîtiers Sol'Ex/Star'Ex est d'une bonne aide (voir figure 14).

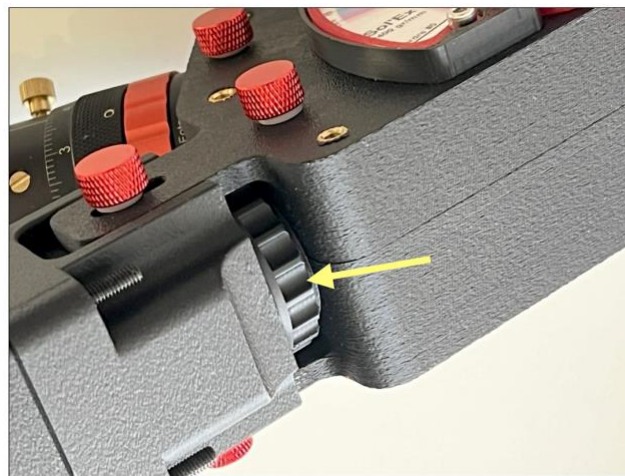


Figure 14. Système de réglage fin du bloc collimateur (boîtier V2 Azur3DPrint).

Etape 6 : Au fur et à mesure que l'astigmatisme diminue, ne pas hésiter à aussi ajuster la focalisation de la caméra. Le but est d'aboutir au résultat présenté à la figure 15. L'image spectrale du trou est alors une tache qui tend à être ponctuelle.



Figure 15. Aspect du spectre du néon lorsque le bon réglage est considéré comme acquis.

A vrai dire, nous n'allons jamais obtenir un point, d'une part à cause des aberrations optiques (en particulier sur la raie tout à gauche de longueur d'onde 6678 A), d'autre part, et surtout, car le trou source possède une dimension finie (25 microns de diamètre), dimension que l'on retrouve dans l'image. La figure 16 présente des vues agrandies de la raie du néon de longueur d'onde 6533 A, qui va servir pour la retouche finale.

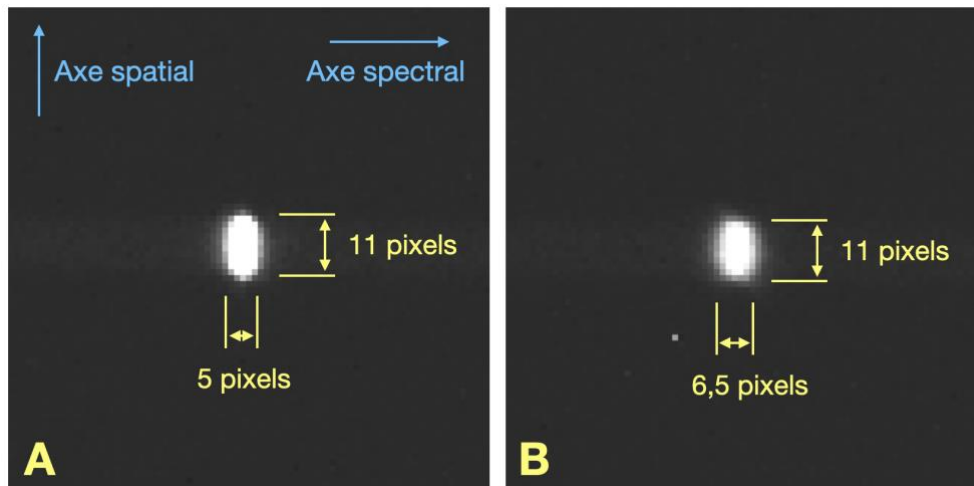


Figure 16. En A, la meilleure image spectrale du trou source pour la raie 6533 Å. En B, le résultat d'une très légère défocalisation du collimateur avec à présent une tache image légèrement plus large.

Compte tenu du grandissement interne de Star'Ex HR (le rapport des focales de 125 mm pour l'objectif de caméra et de 80 mm pour l'objectif collimateur) et de la taille des pixels de la caméra utilisée (ici une ASI533MM avec des pixels de 3,76 microns), on calcule que l'image du trou doit faire 11 pixels suivant l'axe spatial ($128 / 80 \times 25 / 3,76$). C'est précisément la valeur trouvée dans les données. Pour ce qui concerne la largeur de la tache image, suivant l'axe spectral, il est nécessaire de tenir compte du phénomène d'anamorphose, qui tend à ovaliser cette tache (facteur de forme de 0,386). L'image A de la figure 16, qui correspond pour nous au meilleur réglage, nous trouvons par la mesure une largeur de 5 pixels, alors que par calcul, en tenant compte de l'anamorphose, donne la valeur théorique de 4 pixels environ. L'écart peut s'expliquer par la présence des aberrations optiques (qui affectent toujours plus l'axe spectral que l'axe spatial) et par la difficulté de la mesure.

Il est très important d'être conscient de la présence de l'anamorphose. La bonne image n'est pas un rond, mais un ovale, même si ce n'est pas intuitif ! Il est possible en ajustant le réglage du collimateur de converger vers une image ronde (en B, dans la figure 16), mais attention, cela va se faire au détriment de la résolution spectrale. L'écart entre les réglages A et B est en réalité très petit et la différence sur les spectres d'étoiles sera infime. De toute manière, dès que l'on s'éloigne significativement de la raie de référence, les images changent naturellement de forme du fait des aberrations optiques.

Le réglage est quasi terminé. Il faut maintenant serrer les vis de maintien du bloc collimateur.

Si vous pointez à présent l'entrée de Star'Ex vers le ciel en plein jour ou vers un mur éclairé par le Soleil, alors que le trou est toujours en place, vous obtiendrez un spectre très similaire à celui que vous réaliseriez de nuit en pointant une étoile de type solaire (figure 17). Le trou dans la fente Star'Ex GEN2 agit effectivement comme un simulateur d'étoile. Vous pouvez, à ce stade, orienter la caméra pour aligner le spectre horizontalement, une tâche que vous n'aurez pas besoin d'effectuer de nuit.



Figure 17. Spectre de la lumière du jour passant par le trou de 25 microns de diamètre. Cette trace du spectre anticipe celle que vous allez obtenir en observant des étoiles.

Etape 7 : Il ne vous reste plus qu'à monter la fente de la largeur qui vous convient dans le support #1 (voir à l'annexe), et votre spectrographe sera prêt à capturer le spectre des étoiles de la meilleure manière possible. Vous pouvez encore travailler de jour, par exemple pour orienter la fente afin que les raies spectrales soient globalement verticales, comme illustré dans l'image de la figure 18. Ici, nous utilisons la fente de 32 microns. La raie sombre est la raie H α , et toute la hauteur de la fente est affichée. La zone blanche en bas correspond à la partie photométrique de la fente.

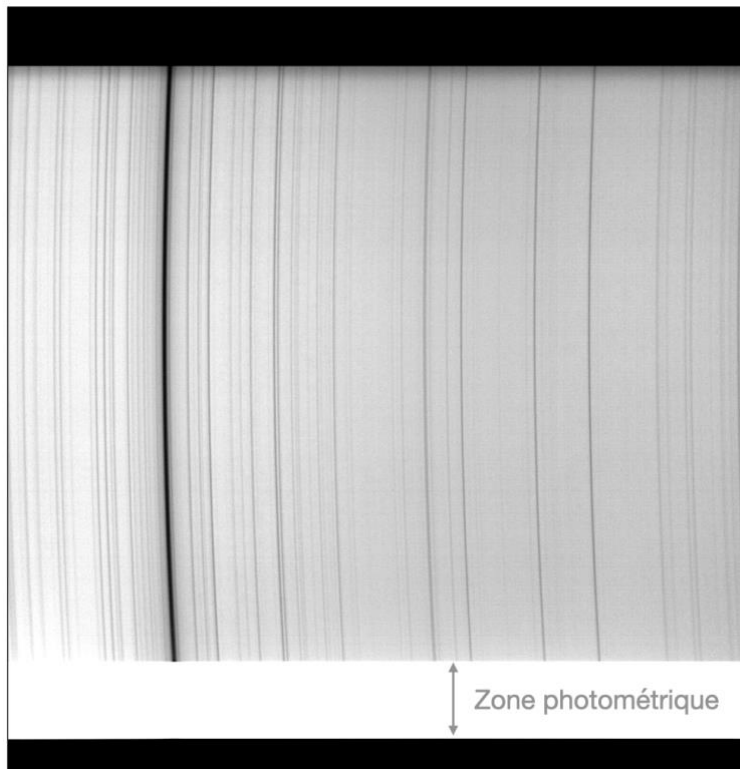


Figure 18. Spectre de la lumière du jour pris avec la fente de 32 microns de large. Suivant la luminosité de la scène visée, il faudra peut-être exposer une dizaine de seconde pour obtenir ce résultat.

La figure 19 présente la même image avec un contraste tel que l'on ne sature plus la zone photométrique. Le spectre solaire apparaît dans cette partie, mais avec une très médiocre résolution spectrale, la fente ne faisant plus 32 microns de large, mais 320 microns.



Figure 19. Le spectre de la lumière du jour en désaturant la zone photométrique de la fente de 32 microns.

Le spectre de la figure 20 est celui d'une lampe néon alors qu'un peu de lumière du jour entre aussi dans la fente. La raie du néon située tout à gauche, de longueur de 6717 A, apparaît moins nette que les autres. Nous atteignons ici les limites du champ spectral en haute-résolution et autour de la raies $H\alpha$ (le résultat est aussi dépendant du rapport F/D à l'entrée de Star'Ex).

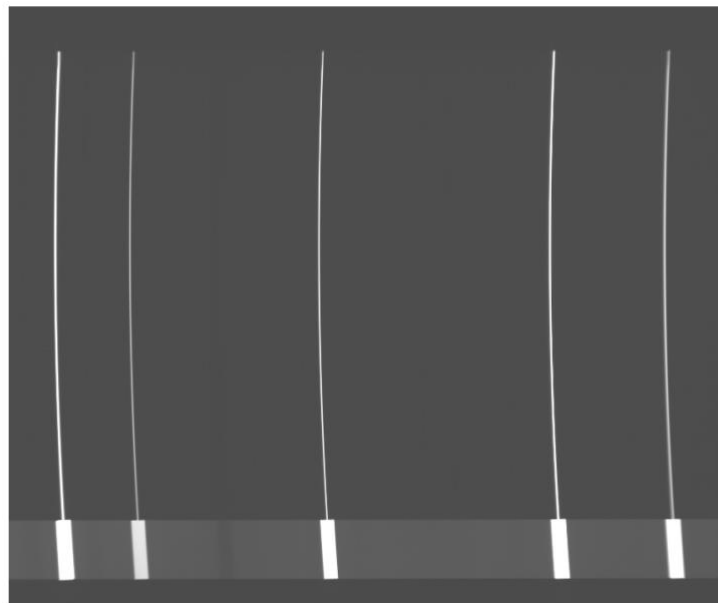


Figure 20. Spectre de raies en émission d'une lampe néon alors qu'une faible lumière du jour passe aussi par la fente.

On notera que la procédure de réglage décrite est réalisable en moins d'une heure, sans quitter sa table et sa chaise.

La procédure est très similaire pour le spectrographe Star'Ex LR (Low Resolution), mais ici le phénomène d'anamorphose est nul. Le bon réglage va produire des images monochromatique rondes et les plus petites possibles (voir figure 21).



Figure 21. Après du spectre de la lampe néon pris au travers du trou de 25 microns une fois le réglage réalisé.

5. Résultats

Il reste à vérifier sur des étoiles réelles et non plus artificielles que notre réglage tiens ces promesses. Pour évaluer le résultat, dans l'exemple à suivre, nous attachons Sol'Ex HR et LR à une lunette Askar 107PHQ (D=107 mm, F=740 mm, F/D=6,9).



Figure 22. Lunette Askar 107PHQ sur laquelle est fixé Star'Ex, le tout sur une monture ZWO AM5.

L'instrument est utilisé en milieu urbain, ce qui permet de bien voir la fente sur le fond de ciel avec la caméra de guidage, comme dans la copie d'écran de la figure 22 montrant la brillante étoile Vega sur la fente de 20 microns de l'ensemble GEN2. On note immédiatement la présence d'images parasite liées à des réflexions sur la lame de la fente, l'étoile étant très brillante et la pose volontairement allongée (la caméra de

guidage est une ASI290MM Mini). Les images fantômes sont ici visibles car le temps de pose est volontairement exagéré. Dans la plupart des situations ces images parasites sont invisibles.

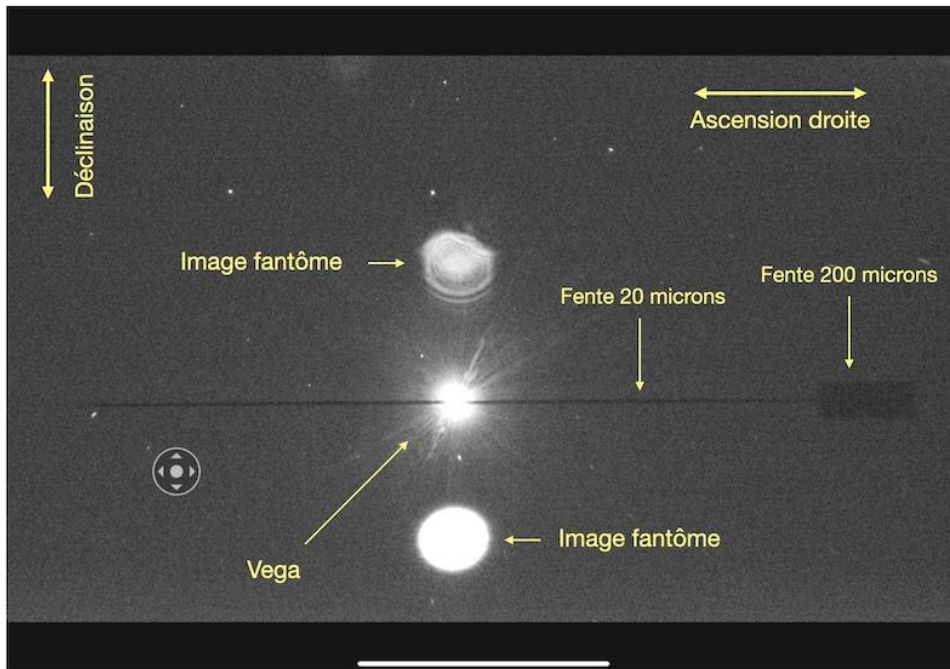


Figure 22. Aspect de l'image de guidage lorsqu'on pointe une étoile brillante. Remarquer le choix d'un guidage en déclinaison et l'orientation de l'axe long de la fente suivant le grand côté du capteur (Sony IMX290).

La figure 23 explique l'origine de ces images parasites et leur intensité relative.

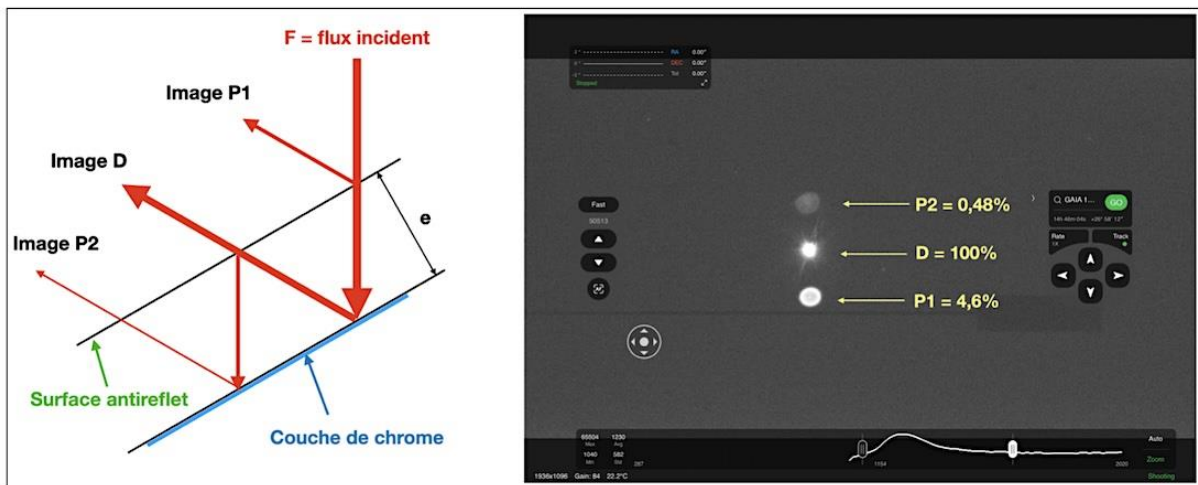


Figure 23. A gauche, le cheminement des rayons expliquant l'origine des images fantômes, qui encadrent l'image nominale (D). A droite, l'intensité relative des images (ici avec une fente 4 positions Lhires III, de 0,5 mm d'épaisseur, mais le résultat est tout à fait similaire avec la fente Star'Ex GEN2 à part que les images fantômes sont plus écartées).

Voici arrivé le moment le plus important, celui qui sanctionne tous nos efforts. Nous focalisons tout d'abord avec soin l'étoile cible dans le plan de la fente (ici de 20 microns de large). Noter ici l'utilisation du système ASIair. Le signe indiquant que l'on est bien focalisé est la visibilité du cœur de l'image stellaire au centre de la fente (voir figure 24). Ce cœur est apparent bien que la lumière de l'étoile entre dans Star'Ex car une partie

est renvoyé par une réflexion vitreuse au niveau de l'ouverture de la fente (environ 5% du flux incident). L'étoile visée est beta Lyre (Shelyak).

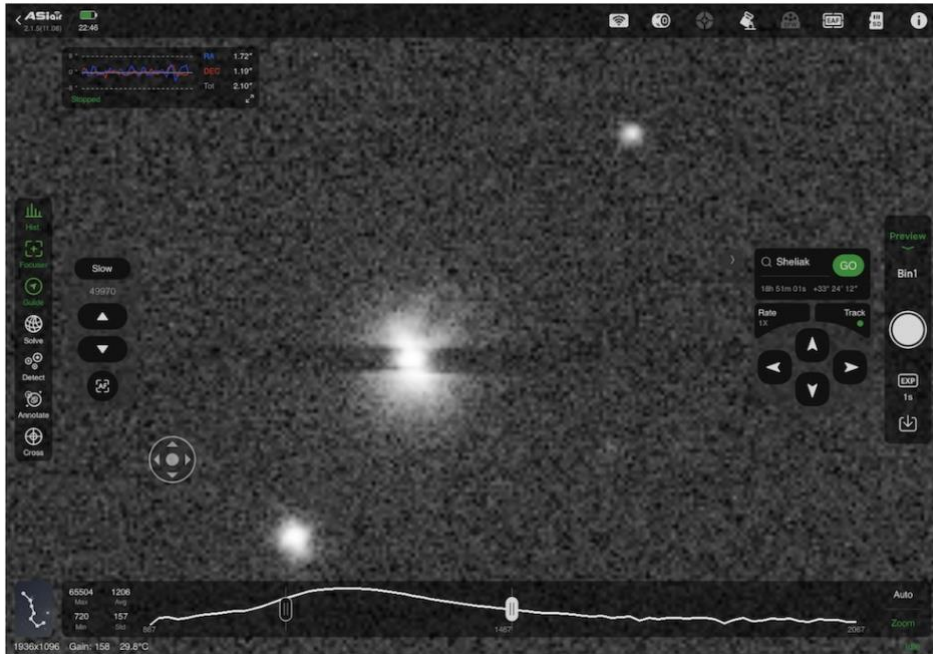


Figure 24. Vue agrandie de l'étoile beta Lyre, centrée sur l'ouverture de la fente faisant 20 microns de large.

Le juge est de paix est d'observer un spectre net et fin de cette étoile dans la caméra science simultanément à la netteté dans la caméra de guidage. C'est bien le cas comme le montre les figures 25 et 26. Le réglage est bien un succès !



Figure 25. Image du spectre de l'étoile beta Lyre (une étoile Be) en haute résolution depuis la raie H α en émission vers la gauche, jusqu'à la raie rouge de l'hélium à droite, toutes deux en émission.

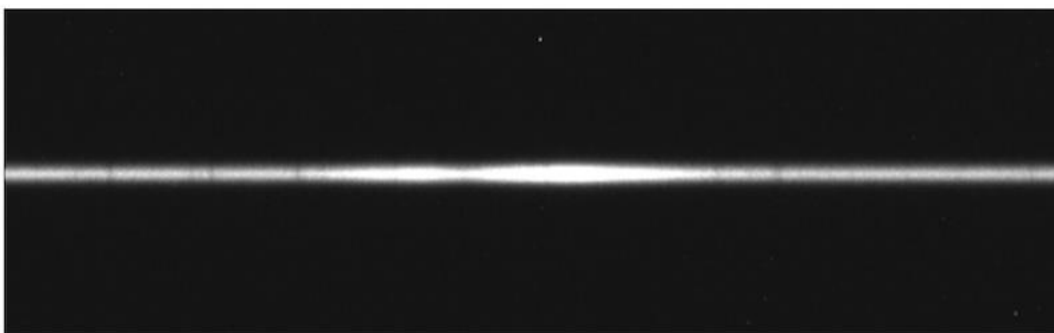


Figure 26. Détails de la figure xxx. Le spectre apparaît très fin, sans aucune trace d'astigmatisme que provoquerait un mauvais réglage.

Nous pouvons aussi contrôler que la fonction photométrique de la fente Star'Ex GEN2 est fonctionnelle. Voici par exemple à la figure 27 l'image de l'étoile Véga centrée sur la grande largeur de la fente. Nous travaillons loin du centre du champ, et l'image est médiocre dans la caméra de guidage. Mais l'important n'est pas là. La figure 28 montre que le spectre de Véga est quasi aussi net, que l'étoile soit positionnée sur la partie étroite ou large de la fente.

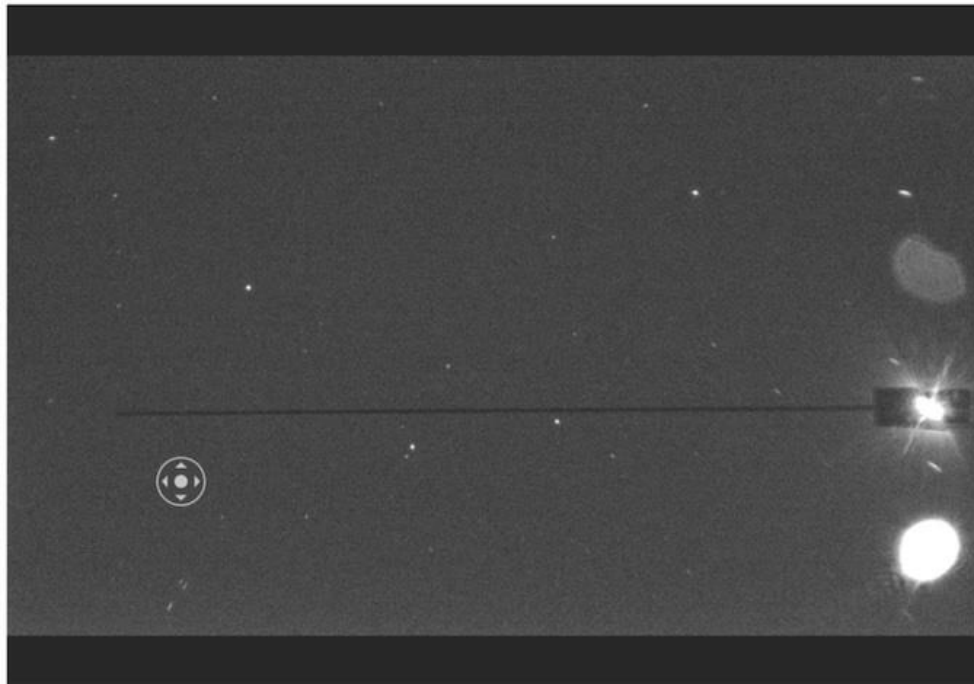


Figure 27. Positionnement de l'image de l'étoile Vega dans la zone photométrique.

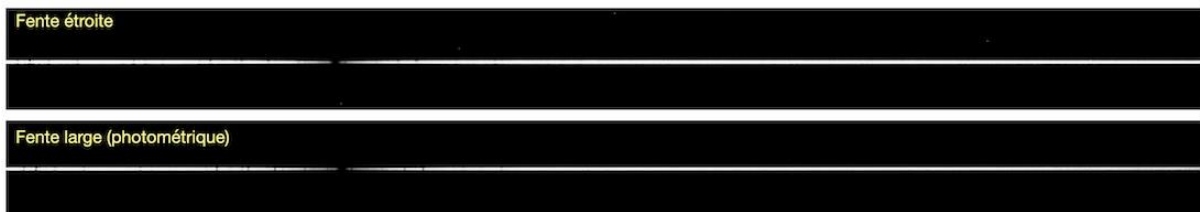


Figure 28. Aspect de la trace du spectre de Véga, soit en utilisant une fente étroite (ici 20 microns) ou une fente large (ici 200 microns).

Les copies d'écran de la figure 29 illustrent l'usage de la fente GEN2 sur un Star'Ex LR (« Low resolution ») avec support #2 (voir à l'annexe), qui positionne le zone photométrique vers le centre de l'image de guidage pour en faciliter l'emploi.

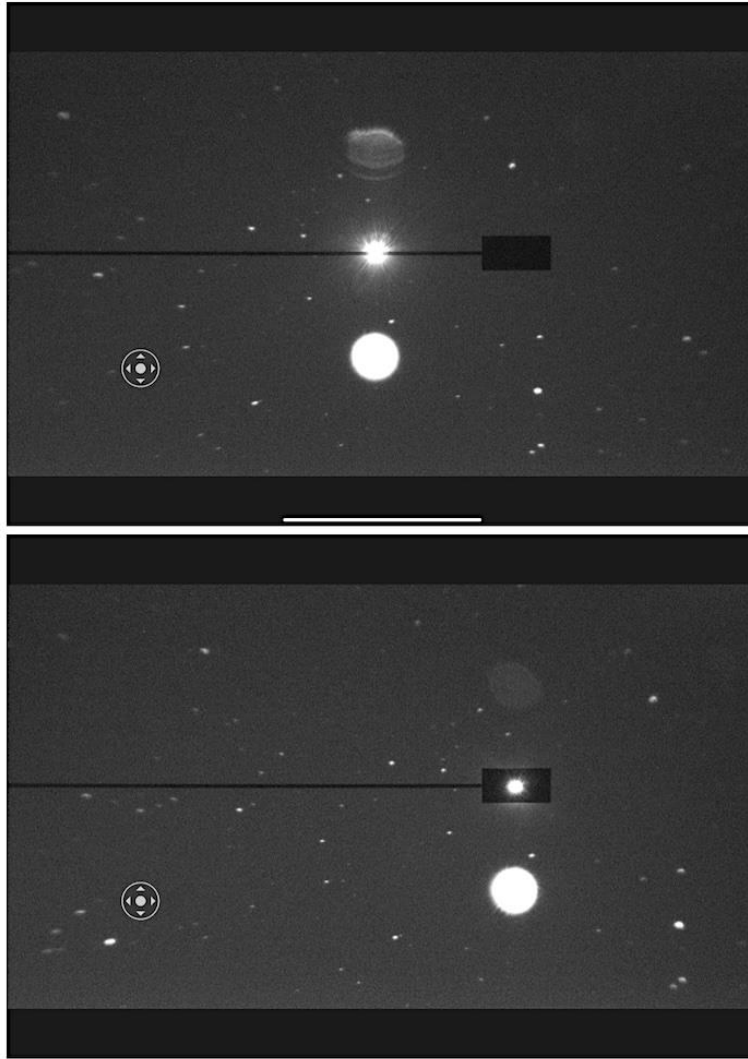


Figure 29. Respectivement en haut et en bas, L'étoile gamma Cyg positionnées dans les zone étroite et large de la fente. Nous utilisons le support de fente #3 qui recentre la zone photométrique par rapport au support #1.

La figure 30 montre l'image du spectre de l'étoile gamma Cyg en basse résolution. Ici encore, la procédure de réglage décrite dans cette note fonctionne parfaitement. Le spectre est bien net, comme le laissait entendre l'observation de l'étoile GEN2, et ce du premier coup.



Figure 30. Image du spectre visible de l'étoile gamma Cyg (exposition unique de 3 secondes).

ANNEXE

Fichiers STL des supports de fente

Trois types de supports de fente sont proposés pour des fonctions spécifiques :

Support #1 : Ce support positionne la fente de manière à centrer sa partie étroite sur l'axe optique de l'instrument. C'est le support standard, celui qui sera le plus utilisé pour l'observation classique des étoiles et des nébuleuses.

Support #2 : Ce support positionne le trou de réglage sur l'axe optique de Star'Ex. Il est utilisé uniquement et brièvement lors de la phase de réglage.

Support #3 : Ce support recentre la zone photométrique de 1 mm sur l'axe optique. Il est destiné à ceux qui souhaitent réaliser des mesures spectrophotométriques et étalonner précisément la courbe de réponse instrumentale de manière routinière (le support #1 permet également cette opération, mais avec une qualité optique moindre, car la zone photométrique est plus éloignée du centre du champ).

Une bride de maintien, commune à tous les supports, complète l'ensemble.

Les fichiers STL correspondants peuvent être téléchargés si vous souhaitez imprimer vous-même ces supports. Il vous faudra alors une imprimante 3D, un peu de fil PET-G, deux inserts M3 et environ une ou deux heures de temps.

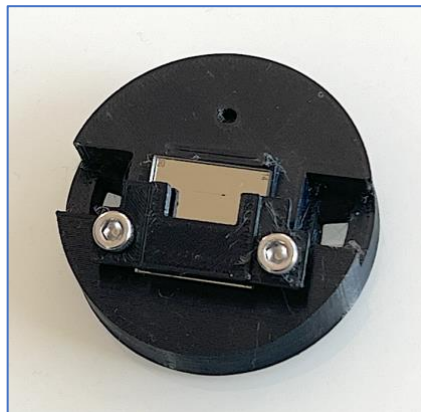


Figure 8. Aspect de la fente dans son support #1 réalisé en impression 3D.

Les supports sont identifiables par le nombre de points présents sur leurs face supérieure : 1 point = le support standard, 2 points = le support photométrique, 3 points = le support pour le réglage avec l'étoile artificielle au centre du champ.

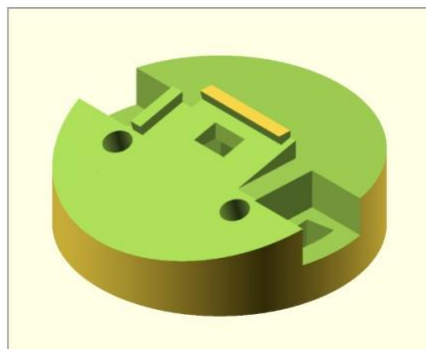


Figure 9. Les supports et le bride du système Star'Ex GEN2.

Fichier STL du support #1 (1 point) à télécharger ici :
http://www.astrosurf.com/buil/starex/slit_starex_gen2_1.stl



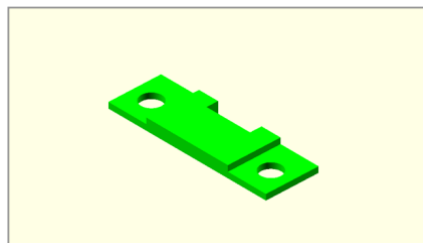
Fichier STL du support #2 (2 points) à télécharger ici :
http://www.astrosurf.com/buil/starex/slit_starex_gen2_2.stl



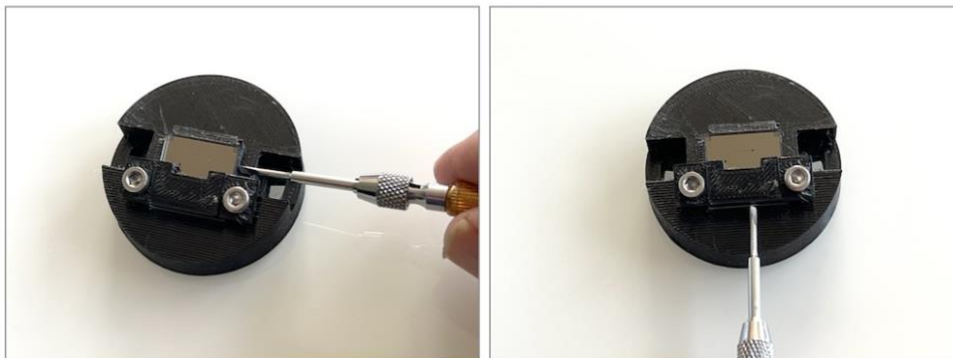
Fichier STL du support #3 (3 points) à télécharger ici :
http://www.astrosurf.com/buil/starex/slit_starex_gen2_3.stl



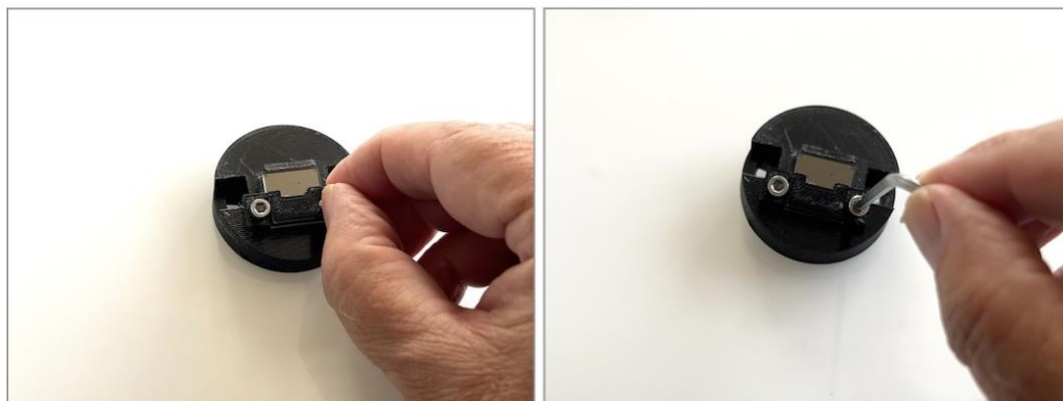
Fichier STL de la bride à télécharger ici :
http://www.astrosurf.com/buil/starex/flange_starex_gen2.stl



Pour finir, quelques recommandations de montage. D'abord, avant de serrer la bride, vérifiez bien que les bords de fente sont bien plaqués sur les épaulements :



La fente Star'Ex GEN2 est nettement plus robuste que les modèles précédemment utilisés, ce grâce à son épaisseur de verre de 2 mm. Il faut cependant serrer modérément la bride, qui par ailleurs est conçue flexible. Le serrage des vis M3 peut se faire à la main, donc avec un petit couple, le maintien de la fente étant alors déjà satisfaisant. Un très léger serrage avec une clef Allen peut être réalisé pour se rassurer, comme on le voit sur les photographies suivantes :



Ci-après, photographie de la fente GEN2 prenant place dans le spectrographe Star'Ex :

